

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE AISLANTES
TÉRMICOS PARA LA APLICACIÓN EN
EDIFICACIONES**

POR

VALERY JANETH GARZA ALEJANDRE

**COMO OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

MAYO 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE AISLANTES
TÉRMICOS PARA LA APLICACIÓN EN
EDIFICACIONES**

POR

VALERY JANETH GARZA ALEJANDRE

**COMO OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

MAYO 2016

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Análisis del Ciclo de Vida de Aislantes Térmicos para la aplicación en Edificaciones», realizada por la alumna Valery Janeth Garza Alejandre, con número de matrícula 1707126, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis



Dr. Simón Martínez Martínez

Director



Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz

Co-Director



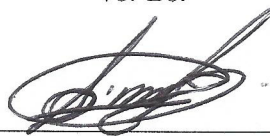
Dr. Alejandro Juan Alvarez Guerra

Revisor

M.C. Miguel García Yera

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Junio 2016

A mis papas con todo el cariño y amor que se merecen.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	xii
1. Introducción	1
1.1. Aislantes Térmicos	2
1.2. Su papel en la construcción sustentable	3
1.3. Características relevantes	6
1.4. Clasificación de los aislantes térmicos	8
1.5. Motivación	9
1.6. Objetivo	10
1.7. Hipótesis	11
1.8. Estado del Arte	11
1.9. Estructura del documento	14
2. Metodología de la investigación	15
2.1. El Análisis del Ciclo de Vida del XPS	15
2.1.1. Concepto de ACV	15

2.1.2. Fases del ACV	17
2.2. Fase de objetivo y alcance	18
2.2.1. Unidad funcional	20
2.2.2. Límites del sistema	21
2.2.3. Supuestos y limitaciones	27
2.3. Inventario del Ciclo de Vida del XPS	30
2.3.1. Recopilación de datos para inventario	30
2.3.2. Representación del inventario	33
2.4. Etapa de evaluación del impacto	34
2.4.1. Categorías de impacto	34
2.4.2. Selección de categorías relevantes	38
2.4.3. Modelos para predecir impactos de GEI	38
2.5. Etapa de interpretación	46
2.5.1. Generación de escenarios de análisis	46
2.5.2. Identificación de variables de alta incertidumbre	53
2.5.3. Análisis de Sensibilidad	54
3. El ACV utilizando la herramienta computacional GEMIS	55
3.0.4. Diagrama de cadena de procesos	56
3.0.5. Escenario de análisis	58
3.0.6. Presentación de resultados	59

4. Resultados	61
4.1. Categorías de impacto asociadas a la producción de XPS	61
4.2. Análisis Comparativo	63
4.2.1. Agentes espumantes	64
4.2.2. Aislantes	68
4.3. Análisis de Sensibilidad	72
4.3.1. Calidad del Gas Natural	72
4.4. Análisis de los beneficios del XPS como parte de la Edificación Social Abierta y Sustentable	76
5. Conclusiones y trabajos futuros	80
5.1. Conclusiones	80
5.2. Trabajo futuro	81

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Marco metodológico general para el ACV [1].	17
2.2. Diagrama general de flujo de proceso del ciclo de vida [2].	22
2.3. Diagrama genérico de ciclo de vida de materiales aislantes [3].	25
2.4. Cadena de proceso del XPS Mexicano desde la obtención de materia prima [4].	25
2.5. Diagrama de Flujo de la manufactura del XPS Mexicano.	26
2.6. Ejemplo de la base de datos de los procesos encontrados en GEMIS [4].	29
2.7. Ejemplo de las fuentes de obtención de los datos en GEMIS [4]. . . .	29
2.8. Ejemplos de factores de emisión [5].	39
2.9. Esquema de metodología aplicada [6].	41
2.10. Emisiones del crudo con los datos base [4].	45
2.11. Emisiones del crudo con los datos modificados [4].	45
2.12. Cadena de proceso del EPS con datos mexicanos desde la obtención de materia prima [4].	48
2.13. Cadena de proceso del yeso con datos mexicanos desde la obtención de materia prima [4].	50

2.14. Cadena de proceso del lana mineral con datos mexicanos desde la obtención de materia prima [4].	51
2.15. Cadena de proceso del PUR con datos mexicanos desde la obtención de materia prima [4].	52
3.1. Información del producto	56
3.2. Proceso de producción de una mezcla de petróleo crudo en EU en el 2010 [4].	58
3.3. Ejemplo de resultados en forma de tabla para un escenario propuesto [4].	59
3.4. Ejemplo de resultados en forma de gráfica para un escenario propuesto [4].	60
4.1. Contribución relativa a las categorías de impacto de la producción de XPS por unidad funcional [4].	62
4.2. Comparación de las emisiones de CO_2 eq entre los diferentes tipos de agentes espumantes que se pueden utilizar [4].	64
4.3. Comparación de las emisiones de SO_2 eq entre los diferentes tipos de agentes espumantes que se pueden utilizar [4].	65
4.4. Comparación de las emisiones de TOPP eq entre los diferentes tipos de agentes espumantes que se pueden utilizar [4].	66
4.5. Comparación de las emisiones de NMVOC entre los diferentes tipos de agentes espumantes que se pueden utilizar [4].	67
4.6. Gráfica de CO_2 equivalente para los aislantes comparados [4].	68
4.7. Gráfica de SO_2 equivalente para los aislantes comparados [4].	69

4.8. Gráfica de Ozono troposférico equivalente para los aislantes comparados [4].	70
4.9. Gráfica de Compuestos orgánicos volátiles para los aislantes comparados [4].	71
4.10. Gráfica para Ozono troposférico y Acidificación disminuyendo la calidad del Gas Natural [4].	72
4.11. Gráfica para GEI disminuyendo la calidad del Gas Natural [4].	73
4.12. Gráfica de Ozono Troposférico equivalente y Acidificación, disminuyendo la calidad del combustóleo [4].	74
4.13. Gráfica para GEI disminuyendo la calidad del Combustóleo [4].	75
4.14. Gráfica para GEI en la vida útil de los aislantes [4].	76
4.15. Gráfica para Acidificación en la vida útil de los aislante [4]s.	77
4.16. Gráfica para Ozono Tropoférico en la vida útil de los aislantes [4].	78
4.17. Gráfica para Uso de recursos No Renovables en la vida útil de los aislantes [4].	78
4.18. Gráfica para Uso de recursos Renovables en la vida útil de los aislantes [4].	79

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Clasificación de los materiales de aislamiento respecto a su composición física y química	9
2.1. Documentos ISO en el análisis del ciclo de vida (ACV)[2].	16
2.2. Propiedades físico-químicas del XPS	21
2.3. Tipos de petróleo en México [7].	32
2.4. Composición del Gas Natural [8].	33
2.5. Composición de los combustibles utilizados para el análisis [9].	33
2.6. Índices de emisiones estandarizados [10].	34
2.7. Unidad Funcional de los diferentes materiales aislantes	34
2.8. Vida útil en años de los diferentes tipos de aislantes a comparar	53
4.1. Categorías de impacto asociadas a la producción de XPS por u.f (1.13 kg) [4].	61
4.2. Comparación bibliográfica del ACV del XPS	63
4.3. Resultados de los materiales de aislamiento bajo estudio [4].	71

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, que desde siempre me han enseñado a luchar por mis sueños y no rendirme. Por que sin su apoyo este trabajo no pudiera haber sido posible.

A mis hermanos, por su apoyo, regaños, consejos y ayuda en todo momento.

Al Dr. Alejandro Alvarez, por sus tardes de tutoría, apoyo y consejos, y por transmitirme sus conocimientos para la realización de este trabajo.

Al Dr. Simón Martínez Martínez, por darme la oportunidad de ser parte de este programa y confiar en mi desde el primer día.

Al Dr. Fausto Sánchez por su soporte como coordinador del programa.

Al Dr. Arturo Morales, por sus consejos y tutoría, asimismo por no dejarme caer en los momentos más difíciles.

A los profesores Dr. Santos Méndez, Dr. Jaime Armendáriz, M.C. Said Zamora, M.C. Miguel García Yera , Dr. Max Salvador Hernández y al Dr. Oscar de la Garza por sus enseñanzas.

A mis compañeros y amigos de maestría, Milton Mendoza, Mayra Mendoza, Jesús Ramírez, Mirna Martínez Victor Madrid, Adolfo Benitez, César Ramírez, Mario Chapa, por su ayuda en todo momento y su amistad incondicional

A mi Novio, por su cariño, apoyo, paciencia, ayuda y por no dejarme caer durante la realización de este trabajo.

A CONACyT. a través de la beca # 375330

A Owens Corning por el apoyo que se dió en la implementación de este conocimiento a través del proyecto (Edificación Social Abierta y Sustentable. Diseño y construcción de proyectos de edificación residencial flexible y adaptable basados en soluciones constructivas y eco-tecnológicas que garanticen su competitividad económica y minimización de impactos ambientales. Proyecto de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica Internacional auspiciado por el Programa de Colaboración Bilateral México - España. Registro 190531 CONACYT - Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI España). Owens Corning S. de R.L. de C.V. - UANL - TECNALIA RESEARCH & INNOVATION - PROERAI.)

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El término sustentabilidad se basa en la premisa de que la sociedad debe vivir en un ambiente sano y que la gente debería utilizar los recursos en una escala constante, de manera que las generaciones futuras puedan satisfacer sus propias necesidades sin superar la capacidad de carga. El logro del desarrollo sustentable requiere un esfuerzo especial de varias áreas de la sociedad, incluido el sector de la construcción [11].

En cambio la edificación sustentable se refiere a la utilización de prácticas y materiales respetuosos del medio ambiente en la planeación, diseño, ubicación, construcción, operación y demolición de viviendas. El término se aplica tanto a la renovación y reacondicionamiento de edificios preexistentes como a la construcción de nuevos edificios [12].

Hoy en día, el consumo de energía en el mundo contribuye a la contaminación, la degradación ambiental y las emisiones globales de gases de efecto invernadero. El crecimiento demográfico y el desarrollo económico condujeron a un aumento en el consumo de energía, por lo tanto, el crecimiento previsible de la población en el futuro y el desarrollo económico, que tendrá lugar en varios países, implican impactos críticos sobre el medio ambiente.

Los materiales para aislamiento térmico tienen un papel importante y son un

primer paso lógico con el fin de reducir la energía necesaria para mantener una temperatura interior adecuada y, por tanto, lograr la eficiencia energética [13]. Las condiciones climáticas en México fomentan el uso de aire acondicionado, en temporadas de calor, y calefacción en invierno, sin embargo, hay otras regiones del mundo, con condiciones climáticas más severas, y la energía utilizada para la refrigeración/calefacción puede ser mucho mayor.

En el mercado mexicano, diferentes materiales de aislamiento térmico están disponibles y agrupados de acuerdo a sus características, entre los más utilizados se encuentran el poliestireno expandido (ESP), el Poliestireno Extruido (XPS), Fibra de roca (lana mineral), Fibra de vidrio, Espuma de Poliuretano (PUR), Polisocianurato, Concreto Celular, Vidrio Celular, Aglomerados de Corcho y Mezclas de Perlita Mineral, los cuáles se describirán más adelante.

1.1 AISLANTES TÉRMICOS

Los aislantes térmicos son los materiales que tienen la capacidad de oponerse al paso del calor por conducción, convección y radiación y se evalúan por su capacidad de aislar térmicamente. En su mayor parte están constituidos por gas (más de 90 %), mismo que está contenido en sólidos que conforman pequeños espacios y le impiden su movimiento. Algunas de sus propiedades convenientes que se podrían considerar son que deben ser resistentes a la intemperie, presentar resistencia mecánica, formar barreras para el paso de vapor y ser resistentes al abuso mecánico, al fuego y autoextinguibles.

Hoy en día, los aislantes desempeñan un papel importante en la mejora del comportamiento energético del edificio. En México el concepto de aislamiento térmico es poco conocido, sin embargo, el tema ha cobrado especial relevancia, ya que en agosto del 2009 se reguló en el país el uso eficiente de energía en la vivienda con la publicación en el Diario Oficial de la Federación de la Norma Mexicana

NMX-C-460-ONNCCE-2009 «Industria de la construcción-aislamiento térmico-Valor R para las envolventes de vivienda por zona térmica para la República Mexicana-Especificaciones y Verificación». A pesar de ser una norma voluntaria, su cumplimiento es obligatorio en caso de que el desarrollador de vivienda pretenda contar con un subsidio federal para vivienda del programa «Ésta es tu Casa», de la Comisión Nacional de Vivienda (Conavi), o de la Hipoteca Verde, del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (Infonavit) [14].

El grado de aislamiento que dicta la norma se hace evidente mediante el análisis de la resistencia térmica total (valor R) que deben cumplir las viviendas a través de la envolvente, previsto de acuerdo con la zona térmica del país en que se ubique. Por lo tanto, para lograr un espesor estándar los materiales de aislamiento necesitaron mejorar sus características, además el incremento en los requerimientos no sólo ocurrió debido al aislamiento térmico, sino también con respecto a la calidad en el ambiente interior y el impacto ambiental.

La envolvente de un edificio se compone de varios elementos estructurales complejos, incluyendo los materiales de aislamiento, que no se consideran una producción independiente de energía o un sistema de conservación. Por lo tanto, tienen que ser evaluados como un componente integral de diseño y construcción de un edificio [15].

1.2 SU PAPEL EN LA CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE

En México se calculan los Gases de Efecto Invernadero (GEI) por medio de un programa nacional voluntario de contabilidad y reporte de GEI y promoción de proyectos de reducción de emisiones GEI. El programa es una alianza público-privada coordinada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión de Estudios del Sector privado para el Desarrollo Sustentable (CESPEDES) del Consejo Coordinador Empresarial. El sector vivienda representa el 26.6 % del consumo total de energía eléctrica en el país [16]. En las viviendas

que utilizan aire acondicionado, el consumo derivado del uso de estos aparatos puede representar hasta el 44 % del total. Es por esto que la Alianza por la Eficiencia Energética (ALENER) nos dice que el uso de aislantes térmicos en techos y muros reduce la necesidad de refrigeración entre 27 y 38 % [14].

Si las edificaciones son diseñadas y operadas adecuadamente, se pueden lograr elevados ahorros de energía, por lo tanto, los diseñadores de la construcción tienen un papel importante en la solución del problema de la energía, cuando se toman decisiones adecuadas a principios de tiempo en relación con la selección e integración de componentes de construcción se pueden ver mejorías en consumo de energía [17]. La envolvente es un componente relevante del edificio, y las paredes externas constituyen una parte importante de la envolvente. Los impactos ambientales de la solución de una pared exterior depende de los atributos de los materiales utilizados, específicamente de los materiales de aislamiento térmico, incluyendo su energía inicial incorporada y sus propiedades térmicas, así como la forma en que la solución está diseñada y construida [18].

Los materiales de aislamiento térmico son unos contribuyentes clave y un primer paso lógico a fin de lograr la eficiencia energética, especialmente en aquellos edificios que están situados en zonas con condiciones climáticas extremas. El aire acondicionado puede contribuir altamente al uso de energía en la operación de los edificios. La cantidad de energía necesaria para enfriar/calentar un edificio depende también del rendimiento final térmico de la envolvente del edificio, por lo tanto, los materiales de aislamiento térmico son aquellos que contribuyen al ahorro de energía utilizado para la calefacción y el enfriamiento de edificios, mejorando el rendimiento energético del edificio, además proporcionan comodidad térmica para periodos largos de tiempo sin depender del aire acondicionado [17].

Hay otros beneficios provenientes de utilizar materiales de aislamiento térmico en los edificios que pueden contribuir directa o indirectamente a una construcción sostenible desde el punto de vista ambiental, económico o social, dichos beneficios

son descritos a continuación [17].:

- **Cuestión de principios** - El uso de aislantes térmicos reduce la dependencia en sistemas mecánicos y eléctricos para proveer confort en las edificaciones, y por lo tanto, la conservación de energía y recursos naturales. La preservación de los recursos naturales debe ser un principio común en los valores humanos.
- **Beneficios económicos** - un costo de energía es un costo de operación, y una gran cantidad de energía puede ser salvada utilizando aislamiento térmico con pocos fondos gastados (aproximadamente 5 % del costo total de construcción). Esto no sólo reduce los costos de operación, sino que también reduce los costos iniciales de los equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado, por que reduce el tamaño del equipo requerido.
- **Beneficios ambientales** - Utilizar aislantes térmicos permite ahorrar costos de operación, resultando en beneficios ambientales y por consiguiente disminuir la dependencia en los sistemas mecánicos y reducir los contaminantes emitidos asociados a éstos.
- **Satisfacción del cliente y el bien nacional** - El uso de más materiales aislantes resulta en ahorros de energía que conducen a: (1) hacer disponible la energía para otros, (2) disminución de los costos del cliente, (3) reducción en los costos de instalar una planta generadora de energía requerida por el aumento en la demanda de electricidad, (4) extensión de la vida de los recursos energéticos finitos y (5) preservación de los recursos para las generaciones futuras.
- **Edificios confortables térmicamente** - El uso de aislantes extiende el periodo de confort dentro del edificio particularmente entre temporadas.
- **Reducción de niveles de ruido**- Los ruidos provenientes de afuera o de los vecinos puede reducirse con el uso de materiales aislantes. Esto hace que se incremente el confort dentro del edificio.

- **Integridad estructural del edificio** - La estructura del edificio puede ser dañada debido a movimientos térmicos adversos ocasionado por altos cambios de temperatura. El uso de aislantes térmicos adecuados ayuda a mantener fluctuaciones mínimas de temperatura en las edificaciones, lo que permite la protección de la integridad del edificio y su contenido, así como el aumento de la vida útil de las estructuras.
- **Prevención de condensación de vapor** - La condensación de vapor puede ocurrir en las superficies de los edificios. Si los materiales aislantes son propiamente diseñados e instalados, pueden ayudar a prevenir este fenómeno. A pesar de eso, la instalación impropia o el pobre diseño de los aislantes térmicos puede ocasionar efectos no deseables a la estructura y tales efectos deben ser prevenidos.
- **Protección al fuego** - En caso de incendio algunos aislantes térmicos cuentan con retardante de flama que puede ayudar a retrasar el calor y evitar la propagación de la flama en la edificación.

1.3 CARACTERÍSTICAS RELEVANTES

Las propiedades térmicas de los materiales utilizados en la envolvente determinan su rendimiento térmico, cuando el material aislante es colocado sin los componentes de la edificación, su rendimiento se puede ver afectado dependiendo de su ubicación. El mejor rendimiento térmico se puede alcanzar mediante la colocación del aislante térmico cerca del punto de acceso de calor. En las regiones donde el clima frío es dominante, se recomienda que el aislante se ubique en la cara interna de la pared externa y, en las regiones cálidas en la cara exterior de la pared externa. Sin embargo, por practicidad de los constructores es muy común colocar el aislamiento en el interior o entre la cavidad de las paredes.

Los aislantes térmicos pueden presentarse en diversas formas, tales como material de relleno, rollos, placas rígidas o espumado en el lugar. La selección del tipo de material de aislamiento y la forma correcta depende mucho de la aplicación, de las propiedades de los materiales, como físicas y térmicas, y del costo.

A continuación se presentan algunos conceptos básicos sobre el rendimiento térmico de los materiales de aislamiento.

- **Aislante térmico** - Se puede definir como un material o la combinación de materiales que retrasan la tasa de flujo de calor por conducción, convección y radiación, cuando se aplica adecuadamente. Este retrasa el flujo de calor desde o hacia el edificio debido a su alta resistencia térmica.
- **Conductividad térmica** - «Es la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área a través de un diferencial de temperatura»[19]. El coeficiente de conductividad térmica, k , en $W/(mK)$ es una propiedad del material que varía con la temperatura y la humedad. La conductividad térmica es una medida de que tan eficiente es el material para conducir el calor. Por lo tanto, ser consciente de los valores de conductividad térmica permite la ejecución de una comparación cuantitativa entre la eficacia de diversos materiales de aislamiento térmico.
- **Resistencia térmica** - «La resistencia térmica es una medida de resistencia (oposición) al flujo de calor como resultado de la supresión de la conducción, convección y radiación»[17]. La resistencia térmica de un aislante depende de su espesor y la conductividad de éste. La resistencia térmica de un medio depende de la configuración geométrica y de las propiedades térmicas del medio [19].
- **Transmitancia térmica** - «La transmitancia térmica es la tasa de flujo de calor a través de una unidad de superficie de área de un componente con una unidad (1 K) de diferencia de temperatura entre las superficies de los dos lados de la componente. Es el recíproco de la suma de las resistencias de todas

las capas que lo componen»[17]. La transmitancia térmica también se conoce como el Coeficiente Global de Transferencia de Calor, U , en $W/(m^2K)$. En otras palabras, el desempeño térmico de la edificación se caracteriza por la tasa de pérdida de calor a través de la envolvente. Entre menor sea el valor- U , menor será la pérdida de calor y consecuentemente menor la demanda de calentamiento y enfriamiento. La conductividad térmica del material aislante en la envolvente dividido por su espesor se define como el valor- U . El valor- R es el inverso del valor- U . Matemáticamente, se puede representar como :

$$U = \frac{\lambda}{d} \quad \text{and} \quad R = \frac{1}{U} \quad (1.1)$$

donde λ es la conductividad térmica (W/mK), d es el espesor (m), R el valor- R (m^2K)/ W y U el valor- U $W/(m^2K)$. Para lograr edificios con bajo consumo de energía, se requiere reducir el valor- U y después reducir la conductividad térmica y/o incrementar el espesor del material aislante. Un cierto material o producto se puede considerar aislante térmico de acuerdo al Código Técnico de la Edificación si presenta una conductividad térmica con un valor por debajo de $0.060 W/(mK)$ y una resistencia térmica con un valor por encima de $0.25 m^2K/W$ [20]

1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS AISLANTES TÉRMICOS

Los aislantes térmicos se pueden clasificar de acuerdo con su estructura química o física (Tabla 1.1). Se pueden dividir en 3 familias [15] [3] [21]: Los orgánicos, los inorgánicos y la combinación de ambos. Dentro de los orgánicos se encuentran los derivados del petróleo llamados «orgánicos sintéticos» y los derivados de plantas o animales llamados «orgánicos naturales». Además, los materiales aislantes pueden presentar estructuras fibrosas, celulares o granulares, que determinará en gran medida sus propiedades mecánicas y térmicas.

	Fibra	Celulosa	Granular
Inorgánico	Lana de vidrio Lana de roca	Espuma de vidrio	Perlita expandida Vermiculita expandida
Orgánico sintético	-	Poliestireno expandido (EPS) Poliestireno extruido (XPS) Espuma de poliuretano (PUR)	-
Orgánico natural	Celulosa Lana de oveja Lana de algodón	Corcho	Corcho granular
Combinaciones	Lana de Madera	Espuma de yeso	-

Tabla 1.1: Clasificación de los materiales de aislamiento respecto a su composición física y química

1.5 MOTIVACIÓN

Sabemos que todas las actividades o procesos provocan impactos medioambientales, consumen recursos, emiten sustancias al medio ambientales y generan otras modificaciones ambientales durante su vida. Nos interesa por tanto, valorar los impactos en el medio ambiente que influyen en el cambio climático, la reducción de la capa de ozono, la generación de ozono, eutroficación, acidificación, entre otras.

En México, de acuerdo a la Comisión Reguladora de Energía (CRE) [22], el sector doméstico abarca el 26.6% de las ventas directas al público, siendo éste el segundo más grande sector consumidor de energía eléctrica. Según la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE)[23] en una vivienda el 44% del consumo eléctrico y el gas natural es por los sistemas de calefacción y/o aire acondicionado, siendo éste el principal consumidor de energía.

Dentro de las recomendaciones que hace la CFE y la CONUEE para el uso eficiente de la energía en la vivienda se encuentra la utilización de tecnologías que

reduzcan los flujos de calor hacia el interior a través de la envolvente, por ejemplo, aislantes térmicos y ventanas doble vidrio.

Es por esto que los materiales aislantes son buenos para reducir este consumo de energía en el hogar, pero no solamente se debe poner énfasis en el producto terminado sino en todo el proceso que tuvo que suceder para que el tablero llegará hasta nuestras manos, es ahí donde se necesita la herramienta del Análisis de Ciclo de Vida, la cuál surgió en los años setenta y es utilizada desde entonces.

Dentro de los beneficios de realizar un análisis de ciclo de vida se encuentran:

- Conocer con el mayor detenimiento posible, los efectos que los productos, servicios o actividades puedan causar al medio ambiente; en especial, los que provocan impactos ambientales significativos adversos, para atender a las responsabilidades legales, sociales y políticas que ellos implican, además de las pérdidas económicas y de imagen empresarial.
- Brindar una base sólida para que la dirección de una organización pueda tomar decisiones técnicas adecuadas con base en las cuestiones que podrían plantearse sobre el lanzamiento de un nuevo producto o la modificación de productos existentes, para hacerlos más eficientes en cuanto a su desempeño ambiental.
- Identificar oportunidades de mejora e implementación efectiva en el producto, para mejorar su desempeño ambiental.
- Disminución de costos por una mayor eficiencia en la asignación y el empleo de materias primas, insumos y energía.

1.6 OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es mejorar las prácticas del uso del poliestireno extruido como aislamiento térmico mediante una adecuada ponderación de sus

beneficios ecológicos, sustentados con evaluaciones de impacto ambiental y la huella de carbono cuantificados mediante un estudio del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Objetivos Particulares:

- La definición de una metodología para analizar los beneficios ecológicos del poliestireno extruido y que en trabajos futuros se pueda utilizar para la comparación de otros aislantes térmicos.
- Comprensión de una herramienta de cómputo (GEMIS) para poder hacer comparaciones de diferentes procesos de producción de aislantes térmicos.

1.7 HIPÓTESIS

A través de un análisis del ciclo de vida se quiere probar si es factible evaluar de forma objetiva y cuantitativa los beneficios ecológicos del uso del poliestireno extruido como aislamiento térmico en comparación con otros materiales en sistemas constructivos en México, lo que conducirá a la implementación de mejores prácticas para la aplicación de estos productos.

1.8 ESTADO DEL ARTE

Una de las propiedades más importantes de un material aislante es la conductividad térmica. Idealmente, si un aislante térmico tiene baja conductividad térmica ($W/(mK)$), es posible obtener envolventes de construcción relativamente delgadas con una alta resistencia valor-R y una transmitancia valor-U bajo [15]. Por consiguiente, el servicio provisto por estos materiales es su aislamiento térmico, con un nivel específico de desempeño en un área específica, y los parámetros de esta unidad funcional debe ser definido para poder comparar diferentes materiales de aislamiento. Varios estudios de Análisis de Ciclo de Vida de soluciones aislantes ya se han

realizado. En la mayoría estos estudios tienen definida la unidad funcional como la masa (kg) de tablero de aislamiento que proporciona una resistencia térmica R de 1 (m^2K/W) [24].

$$f.u = R\lambda\rho A \quad (1.2)$$

Donde R representa la resistencia térmica como 1 (m^2K)/ W , λ es la conductividad térmica medida en $W/(mK)$, ρ correspondiente a la densidad del producto aislante en (kg/m^3) y A es el área de 1 m^2 . Varios estudios ya han analizado el desempeño térmico y económico de los materiales de aislamiento térmico en edificaciones y se mencionaran algunos.

Ardente et al [25]., nos presentan un estudio del análisis de ciclo de vida de un panel de aislamiento de fibra de kenaf siguiendo las normas internacionales de la serie ISO 14040, dicho estudio engloba cada etapa del ciclo de vida, desde la producción de kenaf (materia prima) y fabricación de los tableros por medio de una firma italiana, hasta su uso y disposición final. El objetivo de esta evaluación era conseguir el perfil ecológico de un producto aislante basado en un material de composición de fibra natural (biomaterial) y comparar la energía y los beneficios medioambientales e inconvenientes relacionados con su empleo en una vivienda residencial típica y el final hacer la comparación con otros materiales de aislamiento térmico. Dentro de sus beneficios en todo su ciclo de vida esta la reducción en el consumo de recursos, el ahorro de energía y disminución del impacto ambiental; y la recuperación, reuso y reciclaje de los productos antes de la disposición final. Aunque el Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta muy útil para estimar la energía efectiva y los impactos ambientales relacionados con productos o servicios, los resultados no representan «exactitud» y «precisión» de los datos, sino que se ven afectados por varias fuentes de incertidumbre. El análisis de sensibilidad es un procedimiento sistemático que ayuda a evaluar los efectos de los métodos y datos seleccionados sobre el resultado de un estudio. El análisis de sensibilidad puede ser aplicado con algunos rangos de variación seleccionados arbitrariamente, o con variaciones de rangos conocidos de incertidumbre. Dentro del estudio se plantean 7 escenarios diferentes respecto al

mayor impacto visto en el estudio del análisis del inventario que fue el consumo de energía y las emisiones de CO_2 para observar los incidentes de estos dos parámetros en el perfil ecológico.

Papadopoulos y Giama [26] realizan un trabajo para examinar el desempeño ambiental de la construcción a través de la selección del material de aislamiento. Los aislantes comparados en este estudio se seleccionaron debido al dominio en el mercado europeo que tienen los materiales fibrosos inorgánicos y los orgánicos espumosos por lo que compararon a la lana de roca y al poliestireno extruido. Se hizo un registro del proceso de producción de ambos aislantes y se evaluó sobre la base de los criterios ambientales con la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida, apoyado por el modelo GEMIS. Los resultados obtenidos los utilizaron para establecer indicadores operativos e indicadores de condiciones ambientales sobre la base del estándar ISO 14031 así como la realización de la Evaluación del Desempeño Ambiental para los dos materiales. Dentro de los aspectos ambientales examinados se encuentra el consumo de energía y los efectos al medio ambiente, el consumo de materiales y la prevención de residuos, el consumo de sustancias perjudiciales y riesgosas para el medio ambiente, entre otros impactos como el uso de tierra, consumo de agua, etc. Los datos iniciales se obtuvieron de una industria griega llamada FIBRAN SA. Papadopoulos y Giama llegaron a la conclusión que el uso de cualquier método sólo puede ser tan exitoso como la validez de la base de datos respectiva. En ese sentido, los resultados extraídos de un estudio ambiental para un edificio tienen que ir acompañados de una declaración detallada sobre el origen de los datos básicos utilizados para la evaluación de los elementos de construcción.

Pargana et al [24]., evalúan los impactos ambientales y el consumo de energía primaria renovable y no renovable en la producción de materiales de aislamiento térmico convencionales (Poliestireno expandido y extruido, poliuretano, corcho aglomerado expandido y arcilla expandida). Los resultados se basan en datos específicos de las empresas cuya calidad se comprobó completamente, modelaron el proceso de energía y un análisis de sensibilidad de los procedimientos asignados. El estudio que

realizaron fue de la «cuna a la puerta» siguiendo las normas internacionales para el Análisis de Ciclo de Vida.

1.9 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento de la presente tesis está estructurado en cuatro capítulos, tal y como se describen a continuación.

El **primer capítulo**, describe el estado del arte de los aislantes térmicos y su papel en la construcción, además muestra la motivación, el objetivo e hipótesis.

El **segundo capítulo**, describe la metodología de investigación, el complemento entre la metodología ISO 14000 para el Análisis de Ciclo de Vida y los cambios realizados para la adecuación a nuestro problema, cada etapa es descrita y al final se realiza un análisis de sensibilidad.

El **tercer capítulo**, hace una descripción del modelo computacional a utilizar (GEMIS), y describe un ejemplo de los cálculos.

El **cuarto capítulo**, muestra los resultados obtenidos de la investigación, se presentan los impactos al medio ambiente, un análisis comparativo y el beneficio que nos trae utilizar el poliestireno extruido en una edificación social abierta y sustentable.

El **quinto capítulo**, plasma las conclusiones del trabajo realizado y plantea una serie de trabajos futuros.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL XPS

2.1.1 CONCEPTO DE ACV

El análisis de ciclo de vida (ACV) se refiere al proceso de compilación y evaluación de entradas, salidas y los impactos potenciales al ambiente de un sistema de producto durante todo su ciclo de vida [27]. El ACV se ha convertido en una herramienta para apoyar las decisiones sustentables, su relevancia todavía es juzgada en términos de la calidad del apoyo que proporciona: ¿da la información requerida, o se puede hacer un mejor trabajo? Esto depende mucho de la pregunta a ser contestada. El punto de partida en la generación del ACV en el pasado era la aplicación a elecciones simples, después de un tiempo poco a poco ha ido abarcando más preguntas.

Dentro de las aplicaciones de un ACV están:

- El análisis del origen de problemas relacionado a un producto en particular.
- Comparación de variantes de mejora de un producto terminado.

- Diseño de nuevos productos.
- Elegir entre un número de productos comparables.

El ACV utiliza un tipo de estado estable intemporal para analizar el sistema, sin descontar efectos. Los procesos en ciclo no son, y no pueden, ser específicos en el tiempo. El único tratamiento explícito de tiempo se encuentra en la consideración de los diferentes temas ambientales como lo son los impactos de GEI, y los efectos tóxicos de los metales pesados [2].

El ACV , en medida de lo posible, es de carácter cuantitativo; cuando esto no puede ser posible, los aspectos cualitativos pueden y deben ser tenidos en cuenta para que se de el cuadro más completo posible de los impactos ambientales involucrados. Los datos fiables son la fuerza motriz detrás de un ACV, es por eso que para la construcción del inventario se necesita una gran cantidad de ellos, tanto de proceso como de producción.

Número	Tipo	Título	Año
14040	Estándar Internacional	Principios y marco de referencia	1996,2006
14044	Estándar internacional	Requisitos y directrices	2006
14047	Reporte técnico	Ejemplos de aplicación de ISO 14042	2003
14048	Reporte técnico	Formato de documentación de datos	2001
14049	Reporte técnico	Ejemplos de aplicación de ISO 14041	2000

Tabla 2.1: Documentos ISO en el análisis del ciclo de vida (ACV)[2].

En la Tabla 2.1 se muestra la serie de normas ISO 14040 sobre el análisis de ciclo de vida englobada dentro de las normas ISO 14000 sobre gestión ambiental, el objetivo de estas normas es facilitar a la empresa metodologías adecuadas para la implementación de un sistema de gestión ambiental, similar a las propuestas por la serie ISO 9000 para la gestión de la calidad.

Para la definición de la metodología del análisis de ciclo de vida del XPS en las

siguientes secciones se definirán los conceptos más importantes a tomar en cuenta, y se profundizará en la serie de normas ISO 14040 para definir las fases de un estudio de ACV.

2.1.2 FASES DEL ACV

Los estándares están organizados dentro de las diferentes fases de un estudio de ACV, estas son:

- Definición del objetivo y alcance.
- Análisis del inventario.
- Evaluación del impacto del ciclo de vida.
- Interpretación del ciclo de vida.

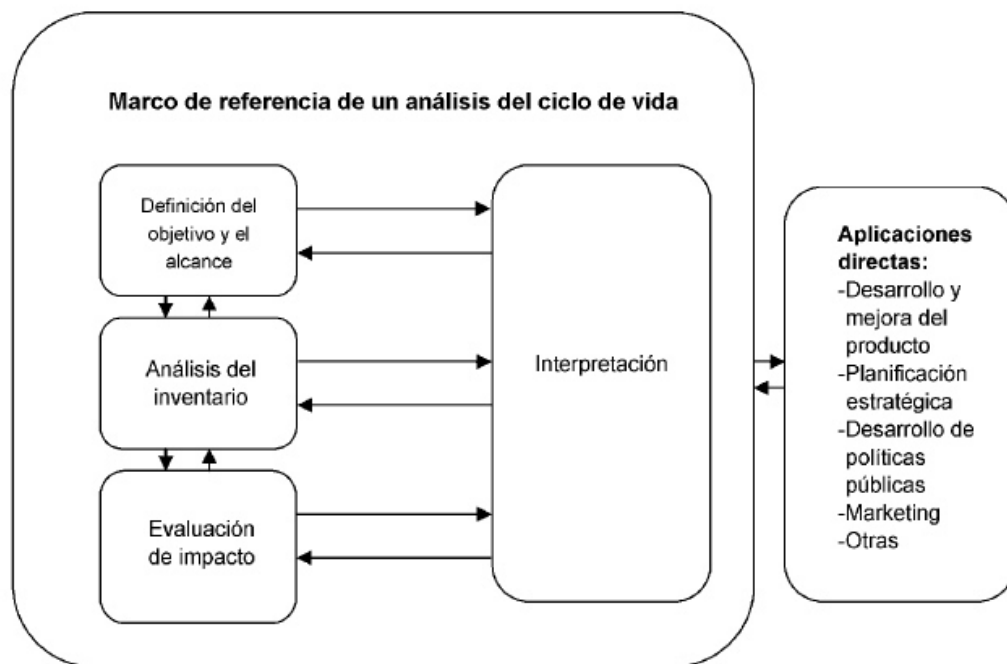


Figura 2.1: Marco metodológico general para el ACV [1].

La relación entre estas fases esta ilustrado en la figura 2.1 la cual se ha convertido en una especie de logo del ACV . Típicamente, el ACV comienza por definir el objetivo y alcance, después se procede al análisis del inventario, luego es opcional continuar con la evaluación del impacto, y termina con la interpretación. Sin embargo, como se indica en la figura 2.1, un estudio del ACV es un proceso altamente iterativo, por lo que los que lo practiquen puede que necesiten volver y revisar desde el objetivo después de haber trabajado en el inventario, o dar una revisión a la interpretación en etapas tempranas. Más adelante, se discutirá la idea principal y el contenido de las cuatro fases en secciones separadas.

2.2 FASE DE OBJETIVO Y ALCANCE

Dentro de las normas ISO no hay una definición explícita, de la primera fase del ACV. Pero aquí es donde se define el plan de estudio lo mas claramente y sin ambigüedades posible.

El objetivo del ACV debe tratar con los siguientes temas [1][28] .

- La intención de la aplicación(es) a estudiar.
- La razón para llevar a cabo el estudio.
- El público objetivo
- Si los resultados se utilizarán como base para hacer afirmaciones comparativas dadas a conocer al público.

Existen dos categorías distintivas en el objetivo del ACV [29]: (1) Para describir un sistema de producto y sus intercambios con el ambiente, y (2) para describir como se puede esperar que cambien los intercambios ambientales como resultado de las acciones tomadas en el sistema.

Dentro del alcance del estudio, se incluyen las fronteras del estudio y el nivel de detalle, pero depende del objetivo a estudiar, por lo que el primer paso en el proceso del inventario de ciclo de vida (ICV) es definir claramente el objetivo.

Los ACV pueden llevar a cabo un sólo sistema, pero la mayoría son comparativos. Los resultados del estudio pueden estar destinados para uso interno o para compartirlos con partes externas. Algunos ejemplos de tipos de ACV y los objetivos son los siguientes [2] :

- Un sólo sistema - Resultados de uso interno
 - Analizar el producto actual para identificar oportunidades de reducción de impacto ambiental.
 - Establecer la línea de base del producto con el cuál poder medir las futuras mejoras.
- Un sólo sistema - Resultados de uso externo
 - Declaración medioambiental del producto. (Por ejemplo para compartir con los clientes que lo solicite información sobre métricas ambientales para el producto).
- Análisis comparativo - Resultados de uso interno
 - Comparar opciones de diseños alternativos para el producto o empaquetado de la propia compañía.
 - Comparar un nuevo concepto de diseño con las alternativas que ya están listas en el mercado para tomar una decisión de desarrollo de negocio.
- Análisis comparativo - Resultados de uso externo
 - Proporcionar una defensa basada en la ciencia a las preocupaciones públicas o críticas de desempeño ambiental de un producto en comparación con las alternativas, incluso de carácter legislativo o prohibiciones propuesta.

- Usar los resultados del ACV como la base de las declaraciones de mercadotecnia que comparan productos de una empresa con productos de la competencia.

Una vez que el objetivo ha sido definido, se pueden tomar las decisiones del alcance. Los aspectos claves en la fase del alcance incluyen la definición del sistema de producto(s) a ser definido; la unidad funcional; las fronteras del sistema tanto en tiempo como en geografía; cuestiones metodológicas como los procedimientos de asignación, las categorías de impacto a ser incluidas, los métodos de evaluación de impacto, y la necesidad de revisión crítica.

Para esta Tesis el objetivo es mejorar las prácticas del uso del poliestireno extruido como aislamiento térmico mediante una adecuada ponderación de sus beneficios ecológicos, sustentados con evaluaciones de impacto ambiental y la huella de carbono cuantificados mediante un estudio del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

En las siguientes secciones se definirá con mayor detalle los puntos anteriores.

En esta fase no se necesita recolección de datos o calcular algún resultado.

2.2.1 UNIDAD FUNCIONAL

Como se define en la ISO 14040 e ISO 14044 «La unidad funcional define la cuantificación de las funciones identificadas (características de rendimiento) del producto. El principal propósito de la unidad funcional es de proporcionar una referencia donde las entradas y salidas estén relacionadas. Esta referencia es necesaria para asegurar que los resultados del ACV son comparables.» [1][27]. La unidad funcional debe ser coherente con el objetivo y el alcance del estudio.

Para este análisis la unidad funcional (u.f) es definida como la masa (kg) de material aislante que envuelve una resistencia térmica valor-R de 1 (m^2K/W) en un

área de 1 m^2 .

$$u.f = R\lambda\rho A \quad (2.1)$$

Para poder obtener la u.f se necesita la obtención de los datos correspondientes al XPS, con la revisión bibliográfica se formuló la tabla 2.2 con los diferentes valores obtenidos y en el cálculo se utilizará un promedio de éstos.

<div style="text-align: right;">Fuente</div> <div style="text-align: left;">Propiedad</div>	Pargana et.al[24]	Thermocal[30]	Madera[31]	Pargana et.al[3]	Empresa
Densidad (kg/m^3)	31.5	35	34	30	•
Conductividad térmica (W/mK)	0.035	0.034	0.034	0.035	0.028
Calor Específico (KJ/KgK)	•	1.450	1.450	•	•
Difusividad térmica ($\times 10^{-7} m^2/s$)	•	6.7	•	•	•

Tabla 2.2: Propiedades físico-químicas del XPS

2.2.2 LÍMITES DEL SISTEMA

Los limites del sistema deben estar definidos en términos de las etapas, la geografía y el tiempo a incluirse en el análisis. Al seleccionar los limites del sistema éstos deben ser coherentes con el objetivo del estudio. Para poder tomar mejores decisiones se deben de tener en cuenta los procesos unitarios incluidos en el estudio y el nivel de detalle al cuál van a ser estudiados.

Etapas del ciclo de vida. La definición de las etapas que se incluirán en el alcance del estudio es un paso crítico, ya que de ahí se desglosará todo el procedimiento a seguir. En la figura 2.2 se ilustran las etapas básicas que debe contener un inventario completo de ciclo de vida, empezando con la extracción de materias primas y continuando con la gestión del canal hacia el final de la vida del producto. Para cada etapa, el inventario cuantifica las entradas tanto de materia como energía, así como las salidas de los productos útiles, subproductos, desechos (incluyendo sólidos) y emisiones (aire y agua). En esta etapa también se incluye el transporte entre

etapas. Los criterios utilizados para establecer los límites del sistema son importantes para el grado de confianza en los resultados de un estudio y la posibilidad de alcanzar su objetivo.

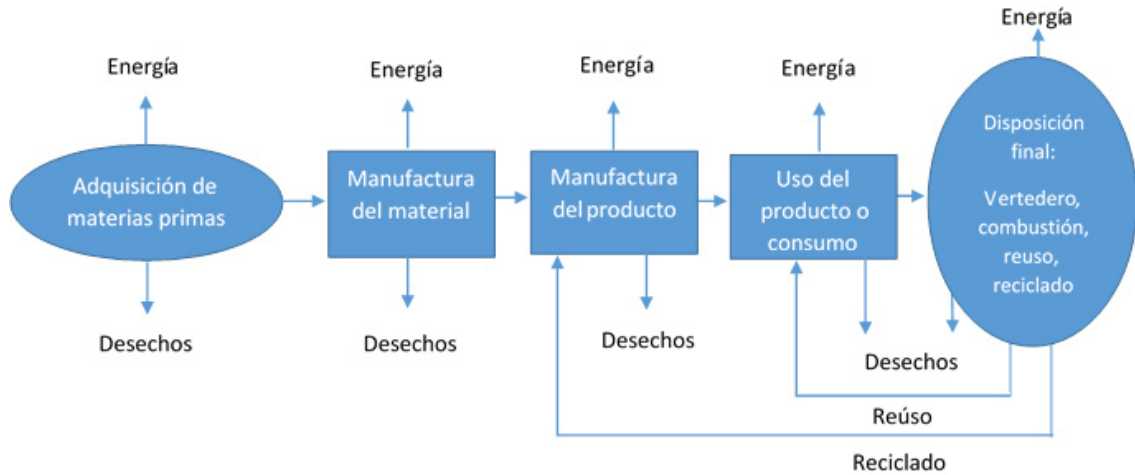


Figura 2.2: Diagrama general de flujo de proceso del ciclo de vida [2].

Dentro de las etapas, procesos unitarios y flujos que se deben tener en cuenta para formular el inventario están los siguientes [1]

- Adquisición de materias primas,
- Entradas y salidas en la secuencia principal de fabricación/ procesamiento;
- Distribución/transporte;
- Producción y utilización de combustibles, electricidad y calor;
- Utilización y mantenimiento de productos;
- Disposición de los residuos del proceso y de los productos;
- Recuperación de productos utilizados (incluyendo reutilización, reciclado y recuperación de energía);

- Producción de materiales secundarios;
- Producción, mantenimiento y desmantelamiento de los equipos;
- Operaciones adicionales, tales como iluminación y calefacción.

Antes de tomar una decisión de excluir etapas del ciclo de vida, procesos, entradas o salidas, se debe tener en cuenta que éstas no modifiquen significativamente los resultados globales del estudio. Si aún así se decide por eliminar algún factor se debe especificar de forma clara y se deben explicar las razones e implicaciones de su omisión.

Límites Geográficos. Los límites geográficos del sistema influyen los factores como el abastecimiento de materias primas, la tecnología usada, la red eléctrica y las distancias de transportación. Las diferencias regionales en el clima, la composición del suelo, la lluvia, etc. pueden dar lugar a variaciones regionales significativas en los rendimientos de cultivos, requerimientos de riegos y aplicaciones y huir de los productos químicos agrícolas. Los límites geográficos también influyen los escenarios del fin de vida. La tasa de reciclaje para los productos puede variar extensamente de ciudad en ciudad o de país en país, ser influenciada por la legislación, el comportamiento del consumidor, y el acceso a los programas de reciclaje.

Límites de tiempo. Al igual que los límites geográficos, los límites de tiempo pueden influir en la exactitud y relevancia del estudio. Los sistemas deben ser modelados utilizando las tecnologías o combinación de ellas que son relevantes para la producción actual de la región donde se lleva a cabo. Para productos de larga vida que tienen impactos significativos de energía en la fase de uso, como los aislantes en los edificios, el ahorro de gases de efecto invernadero a través del tiempo pueden ser influenciados por los cambios en el suministro de energía, incluso si las propiedades del producto no cambian con el tiempo.

Categorías de Impacto. Cuando se determina el alcance de un proyecto, es importante definir las categorías de impacto que se van a incluir en los resultados,

ya que esto influye en la recopilación de los datos requeridos, las categorías más relevantes son: los gases de efecto invernadero, eutroficación, acidificación, creación de ozono fotoquímico, agotamiento de recursos abióticos y destrucción de ozono atmosférico, y son mencionadas en la sección 2.4.1

Criterios de corte de información. En la práctica, los datos a menudo no están disponibles para algunos procesos o materiales porque no pueden ser obtenidos dentro del tiempo o presupuesto limitado del estudio. Esto sucede a menudo en análisis comparativos donde una organización patrocina el estudio y sólo puede proporcionar datos detallados de su propio sistema, pero los sistemas alternativos deben modelarse utilizando datos a disposición del público. Antes de tomar la decisión de excluir algún dato, es importante considerar cuidadosamente el efecto potencial sobre los resultados del estudio.

Los límites en el ciclo de vida de los materiales de aislamiento térmico de la cuna a la tumba se presentan en forma genérica en el diagrama de flujo en la figura 2.3 y las etapas se listan a continuación:

- E1 Producción/extracción de materias primas;
- E2 Transporte y almacenaje de materias primas;
- E3 Manufactura del material aislante;
- E4 Empaquetado del material aislante.

Para este caso en específico el problema incluye todas las etapas desde la producción de materias primas hasta el empaquetado del material aislante.

La fase de uso del material aislante no es considerada por no contar con la información necesaria para abarcar este tema por lo que fue ignorada. Asimismo el transporte de la fábrica al sitio de construcción y el escenario de disposición final, no son incluidos dentro del límite del sistema a estudiar.

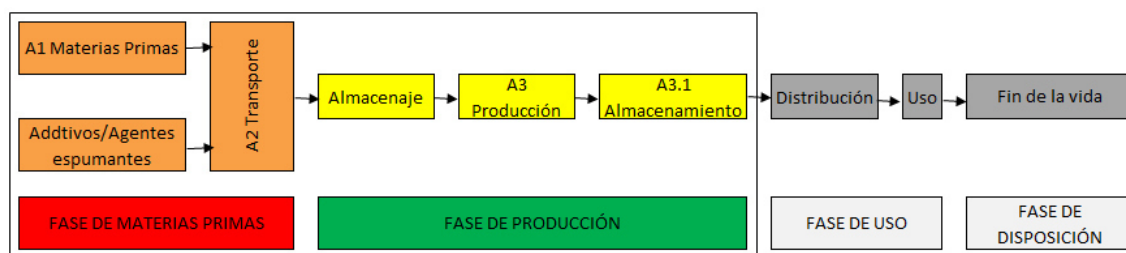


Figura 2.3: Diagrama genérico de ciclo de vida de materiales aislantes [3].

El periodo de estudio es considerado de un año para los dos primeros escenarios, para el tercero será de cincuenta años.

2.2.2.1 CADENA DE PROCESOS DE XPS

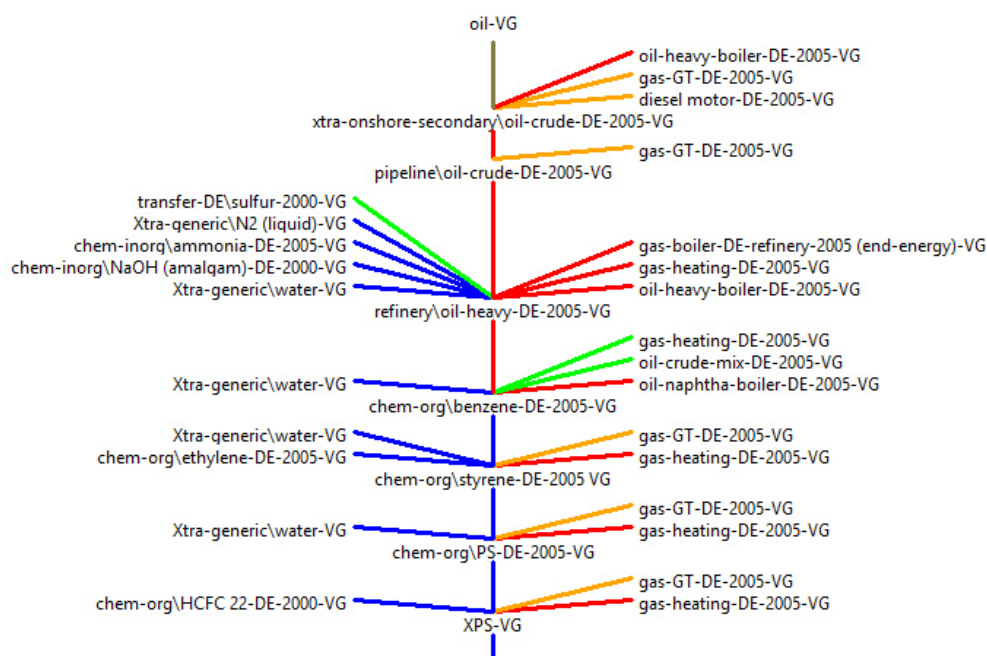


Figura 2.4: Cadena de proceso del XPS Mexicano desde la obtención de materia prima [4].

- Producción de materias primas: La manufactura del XPS envuelve varias materias primas y aditivos. La materia prima principal utilizada es el poliestireno granulado, el cuál se encuentra almacenado en contenedores. El proceso de extrusión requiere de agentes espumantes, para nuestro caso se utilizó HCFC 22. Los agentes espumantes también son colocados en contenedores. El proceso de producción del XPS requiere de aditivos, incluyendo un nucleador orgánico, un nucleador inorgánico, retardante de flama y colorante. El desperdicio derivado de la demolición también es usado. En esta base no se requiere de agua para propósitos de limpieza. Adicionalmente se utiliza nitrógeno para mantener la presión en los tanque de los agentes espumantes y para propósitos de limpieza.
- Producción del XPS
 - Fusión y mezclado
 - Extrusión
 - corte y formado

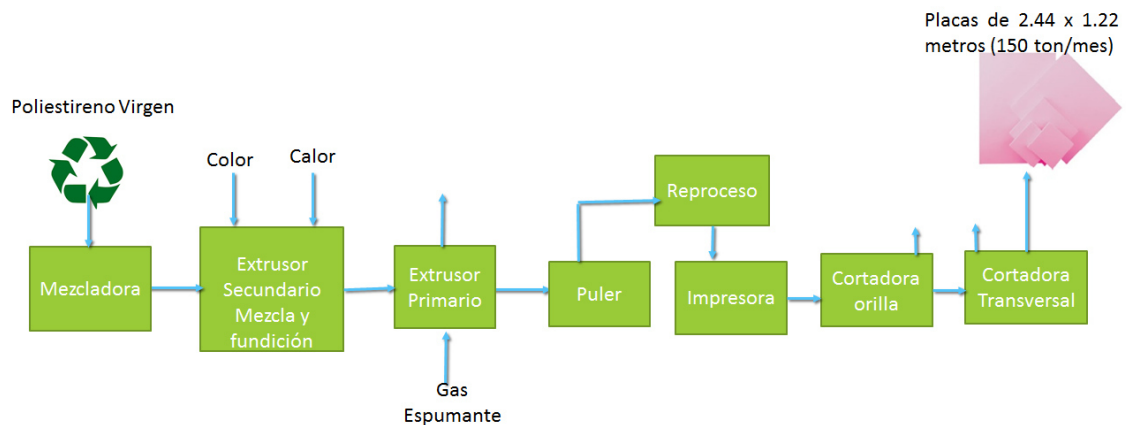


Figura 2.5: Diagrama de Flujo de la manufactura del XPS Mexicano.

2.2.3 SUPUESTOS Y LIMITACIONES

Esta metodología hace la suposición de tres puntos, los cuáles son los siguientes:

- Los impactos en el medio ambiente son directamente proporcionales a la cantidad de emisiones generadas.
- En esta metodología las emisiones generadas se consideran en forma aislada, es decir: no hay interacciones que ocasionen impactos más elevados.
- La metodología está centrada en evaluar y cuantificar impactos en el medio ambiente e impactos económicos, pero no estima impactos sociales y/o impactos laborales.

Para nuestro problema los supuestos que se consideraron son los siguientes:

- Los impactos ambientales del aislamiento y la fase de uso no son significativos para el estudio y por lo tanto no son tomados en cuenta.

Las limitaciones del estudio de ACV también han sido identificadas:

- El estudio se limita a las fronteras del sistema definidas anteriormente.
- Los modelos de aislamientos utilizados fueron construido a partir de la base de datos del GEMIS.
- Para el XPS, en la última etapa (manufactura del aislante) se hicieron las siguientes suposiciones para calcular la energía eléctrica y el uso de combustible:
 1. 10 motores.
 2. 2 bombas dosificadoras de 1hp c/u.
 3. Consumo de gas natural para calentamiento.

- La evaluación del impacto ambiental se limita a los GEI, NMVOC, eutrofización y ozono troposférico, así como el consumo de energía primaria no renovable y la energía primaria renovable; ya que los GEI son los que más nos interesan en esta investigación y las demás categorías resultan relevantes según investigaciones similares que han sido consultadas [3, 24, 25, 26].

2.2.3.1 INFORMACIÓN DE BASES DE DATOS INTERNACIONALES Y FUENTES LOCALES

Para la obtención de los modelos se utilizó el software GEMIS, el cuál trae precargadas bases de datos para productos y procesos, cuenta con 1124 y 9538, respectivamente.

Los datos son validados y evaluados para verificar su calidad y confiabilidad y sus resultados están reportado en el software.

En la figura 2.6 se muestra una imagen de la amplia base de datos con la que cuenta GEMIS para sus procesos, asimismo, en la figura 2.7 se muestran las fuentes de donde se obtuvieron dichos datos, se puede observar en esta última que la fuente de información es el Instituto de Ecología Aplicada (Oeko) del gobierno Alemán y el Instituto Fraunhofer de Investigación sobre Sistemas e Innovación (ISI). Estas instituciones avalan la validez y confiabilidad de los datos.

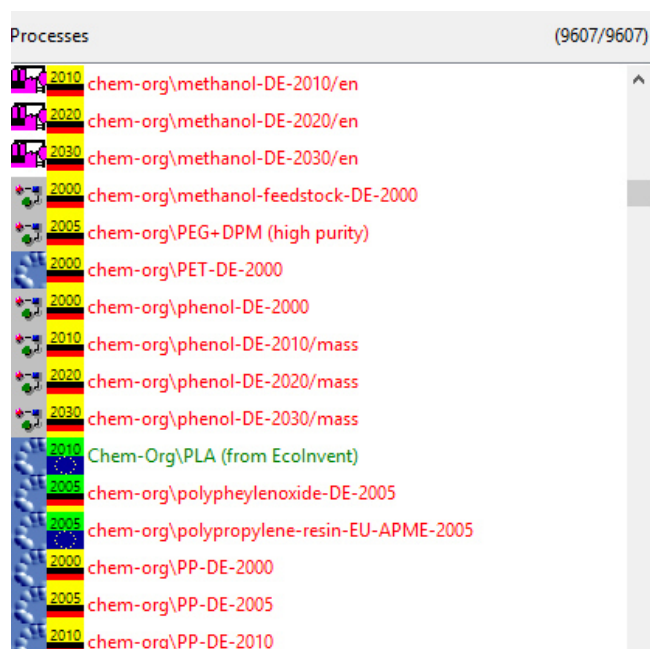


Figura 2.6: Ejemplo de la base de datos de los procesos encontrados en GEMIS [4].

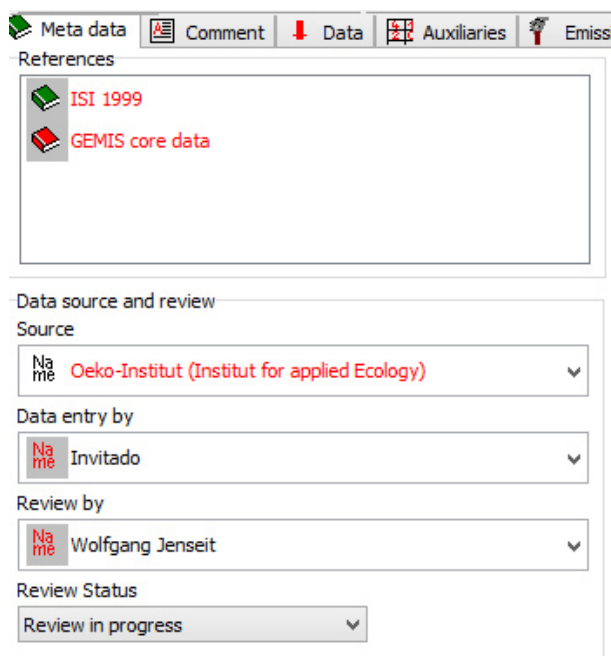


Figura 2.7: Ejemplo de las fuentes de obtención de los datos en GEMIS [4].

2.3 INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DEL XPS

2.3.1 RECOPIACIÓN DE DATOS PARA INVENTARIO

Para el cálculo del inventario se obtuvo información directamente de ex Directores de Pemex y de consultas en las bases de datos de dicha empresa para cálculos de emisiones, precios y composición en la cadena de producción de estireno.

Por medio de consultas en internet de algunos proveedores se obtuvieron las densidades de los combustibles y las propiedades fisico-químicas de los aislantes a comparar. Se caracterizaron los procesos como la producción de poliestireno extruido para darnos una idea del funcionamiento con información de fabricantes y videos de las maquinarias utilizadas.

En realidad fue difícil la obtención del inventario ya que para que los datos y resultados sean lo más cercanos a la realidad se debe de contar con el apoyo de las empresas para poder obtener la información adecuadamente y no hacer una larga lista de suposiciones, en este caso la empresa con la que se trabajo sólo pudo proporcionar el dato de la producción mensual de XPS y a groso modo el diagrama de proceso. En cuanto a todo lo demás, como la cantidad de energía necesaria para producir esa cantidad mensual de material, el tipo de espumante o la cantidad de agua utilizada, todo fue supuesto o calculado con balances de materia y energía.

2.3.1.1 TIPOS DE DATOS

Dentro de los datos que se necesitan recopilar para el análisis de los materiales aislantes en primera instancia están los procesos de producción, para empezar se necesitó el diagrama de flujo para la obtención de estireno, ya que de él se obtiene el poliestireno y por consecuente obtener el poliestireno extruido.

Asimismo, se necesita información acerca de la electricidad y el calentamiento de agua en México, ya que la mayoría de las bases de datos son extranjeras, desde europeas hasta estadounidenses, pero estos valores o la forma de obtención de dichas fuentes no es representativa para nuestro país.

En cuanto a los factores de emisión utilizados el Diario Oficial de la Federación, en el acuerdo para cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero [32], da la indicación que no deben utilizarse Factores de Emisión de referencias internacionales, ya que « los factores de emisión requeridos en el Registro, para efectos de certificación de reducción o mitigación de emisiones deberán ser específicos a las fuentes reportadas y derivarse de mediciones directas y/o representativas de las condiciones operativas de dichas fuentes ».

2.3.1.2 FUENTES DE OBTENCIÓN

La información que se requiere para el análisis se obtuvo mediante diferentes bases de datos y suposiciones respecto a otros estudios de ciclo de vida de aislantes térmicos realizados anteriormente por academias internacionales como la Universidad de Lisboa en Portugal [3, 24], la Universidad Aristóteles de Tesalónica en Grecia [26] y la Universidad de Palermo en Italia [25], también la Universidad de Manchester, en el Reino Unido, realizó un estudio de las emisiones de ciclo de vida de las diferentes formas de generación eléctrica en México [33].

Para la obtención de los precios y el volumen de la producción anual de varios productos químicos utilizados en la producción de materias primas, como lo son el benceno, el petróleo refinado, el estireno y algunas resinas sintéticas como el poliestireno, se consultó la base de datos del INEGI [34].

Por otro lado, también era necesario modificar la composición de los combustibles utilizados, en nuestro caso combustóleo y gas natural, ya que el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) comenta que en México, aproximadamente el 70 %

de la energía eléctrica proviene de la combustión de éstos hidrocarburos [35].

Para el combustóleo, se propone utilizar un combustible alternativo que es el crudo (petróleo) , existen diferentes tipos en el país, como el Pánuco, el Maya, el Istmo y el Olmeca, se diferencian por la gravedad API o $^{\circ}API$, por sus siglas en inglés *American Petroleum Institute*, es una medida de densidad que precisa cuán pesado o liviano es el petróleo. En la tabla siguiente se muestran las características de cada uno.

Crudo	Tipo	$^{\circ}API$	%S
Pánuco	Pesado	10	3.0
Maya	Mediano	22.6	3.3
Istmo	Ligero	33.74	1.45
Olmeca	Super ligero	39.3	0.8

Tabla 2.3: Tipos de petróleo en México [7].

Para la propuesta a ser analizada, se tomó de base el crudo Maya debido a que es el que posee el peor escenario posible en cuanto a contaminantes. Como se puede observar en la tabla 2.3, el crudo Maya se clasifica de acuerdo a su gravedad API en mediano, sin embargo, su alto contenido de azufre lo ubica en la categoría de petróleo pesado. En la siguiente sección se describe los parámetros a utilizar 2.5.

En cuanto al gas natural, se obtuvo la tabla 2.4 con las composiciones típicas en México y se muestra a continuación:

Componente	Fórmula	Gas No Asociado	Gas Asociado
Metano	CH ₄	95-98 %	60-80 %
Etano	C ₂ H ₆	1-3 %	10-20 %
Propano	C ₃ H ₈	0.5-1 %	5-12 %
Butano	C ₄ H ₁₀	0.2-0.5 %	2-5 %
Pentano	C ₅ H ₁₂	0.2-0.5 %	1-3 %
Dióxido de Carbono	CO ₂	0-8 %	0-8 %
Nitrógeno	N ₂	0-5 %	0-5 %
Ácido Sulfúrico	H ₂ S	0-5 %	0-5 %
Otros	A, He, Ne, Xe	trazas	trazas

Tabla 2.4: Composición del Gas Natural [8].

2.3.2 REPRESENTACIÓN DEL INVENTARIO

En la siguiente tabla 2.5 se muestra un resumen de las composiciones modificadas en los combustibles empleados para la simulación del ACV del Poliestireno Extruido Mexicano.

Compuesto	Combustóleo	Diesel
C	83.84	84.6
H	12.3	9.7
O	0.47	N/A
N	0.386	1
S	3.454	2.7
Agua	N/A	1.5
Ceniza	N/A	0.5

Tabla 2.5: Composición de los combustibles utilizados para el análisis [9].

Por otro lado, se muestra en la figura 2.6 los resultados obtenidos para los índices de emisiones estandarizados de NO_x, SO₂, CH₄ y PM₁₀, expresados en g/BPCE

mediante un ACV en la refinería de Miguel Hidalgo en el municipio de Tula, Hgo.,

	CONTAMINANTE (g/BPCE)			
Petrolífero	CO	NO _x	SO ₂	PM ₁₀
Diesel	36.09	70.73	1129.89	32.570
Combustóleo	35.57	69.7	1113.41	32.095
Turbosina	36.09	70.73	1129.89	32.570

Tabla 2.6: Índices de emisiones estandarizados [10].

Para obtener la unidad funcional del XPS se realizó un promedio de la Tabla 2.2 planteada anteriormente, y para los demás aislantes como se calcula con propiedades físicas se obtuvieron de [3] y se plasman en la Tabla 2.7

Aislante	Peso (kg) U.F
XPS	1.13
EPS	550 E-3
PUR	810 E-3
Lana Mineral	1.16
Yeso	10

Tabla 2.7: Unidad Funcional de los diferentes materiales aislantes

2.4 ETAPA DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO

2.4.1 CATEGORÍAS DE IMPACTO

El primer paso o etapa dentro del marco de un ACV es la selección de las categorías de impacto ambiental a tener en cuenta en el estudio. Estas categorías

representan los impactos ambientales de interés a los cuales se quieren asignar los resultados del EICV (Estudio del inventario de ciclo de vida). Es decir, los impactos ambientales de los cuales se desean obtener resultados. Existen multitud de categorías de impacto ambiental, y la selección de unas u otras en el ACV que se lleve a cabo dependerá del objetivo del estudio, público objetivo y nivel de exactitud de los resultados requeridos. La SETAC (Sociedad de Toxicología y Química), así como el documento *Reglas de categoría del producto*(RCP), para la preparación de una EPD, que es una declaración ambiental certificada elaborada en conformidad con la norma ISO 14025, para materiales de aislamiento [36], y el documento estándar por EPD Europeo, relativo a las normas básicas para la categoría de productos de construcción [37], sugieren las siguientes categorías de impacto para el análisis; la acidificación, la eutroficación, la creación de ozono fotoquímico y el agotamiento de los recursos abióticos. Según estos documentos, la categoría de cambio climático y destrucción de ozono atmosférico también deben ser incluidos en la fase de la AICV. A continuación se describirán a detalle cada una de ellas[38].

Acidificación. Los gases ácidos como el dióxido de sulfuro SO_2 al reaccionar con el agua de la atmósfera ocasiona el fenómeno conocido como «lluvia ácida», un proceso conocido como depósito ácido. Esta lluvia a menudo cae a una distancia considerable de la fuente original del gas causando un deterioro del ecosistema de grado variable, dependiendo de la naturaleza de los paisajes del ecosistema. Los gases que causan la deposición ácida incluyen amoníaco (NH_3), óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x)

El potencial de acidificación es expresado utilizando la unidad de referencia, Kg SO_2 equivalente. El modelo no tiene en cuenta las diferencias regionales en términos de qué áreas son más o menos susceptibles a la acidificación. Representa sólo la acidificación causada por SO_2 y NO_x , incluyendo el uso de fertilizantes.

Cambio Climático. Así se le conoce al cambio en la temperatura causado por el efecto invernadero que es liberado por «gases de efecto invernadero» creado por

actividades humanas. Este aumento en la temperatura global se espera que cause perturbación del clima, la desertificación, la subida del nivel del mar y propagación de enfermedades. El cambio climático es uno de los mayores problemas ambientales de la actividad económica, y uno de los más difíciles de manejar por su amplia escala.

Los factores se expresan como potencial de calentamiento global en el horizonte de tiempo de diferentes años, siendo los 100 años el más común (GWP100), medidas en la unidad de referencia, en kg de CO₂ equivalente.

Agotamiento de recursos abióticos. Esta categoría de impacto se refiere al consumo de recursos no biológicos como los combustibles fósiles, minerales, metales, agua, etc.

El valor del consumo de los recursos abióticos de una sustancia es una medida de la escasez de la sustancia. Esto significa que depende en el monto de recursos y la tasa de extracción. Está formado por la cantidad de recursos que se agotan y se puede medir en equivalentes de antimonio para algunos modelos, o en consumo de agua (m^3), kg de agotamiento de minerales o MJ de combustibles fósiles para otros.

Ecotoxicidad. La toxicidad ambiental es medida en tres categorías de impacto que examinan agua dulce, agua marina y a la tierra. La emisión de algunas sustancias, como los metales pesados, pueden tener impactos en los ecosistemas. El análisis de la toxicidad se ha basado en las concentraciones máximas tolerables de estas sustancias en el agua para los ecosistemas. Los factores de caracterización se expresan utilizando la unidad de referencia, kg de 1,4-diclorobenceno (1,4-DB) equivalente y se miden por separado para cada uno de los tres diferentes ecosistemas.

Eutroficación. Esta categoría representa la acumulación de una concentración de nutrientes químicos en un ecosistema que conduce a la productividad anormal. Esto causa el crecimiento excesivo de plantas como las algas en los ríos que provoca severas reducciones en la calidad del agua y la población de animales. Las emisiones de amoníaco, nitratos, óxidos de nitrógeno y fósforo en el aire o el agua todos tienen un impacto en la eutroficación. Esta categoría se expresa mediante la unidad de

referencia, kg PO_4^{3-} equivalente. Impactos directos e indirectos de los fertilizantes son incluidos en este método. Los impactos directos son por la producción de los fertilizantes y los indirectos se calculan estimando las emisiones al agua causadas por la eutroficación.

Toxicidad humana. Este índice refleja el daño potencial de una unidad de producto químico liberado en el medio ambiente, y que se basa tanto en la toxicidad inherente de un compuesto como en su dosis potencial. Estos subproductos, principalmente arsénico, dicromato de sodio, y fluoruro de hidrógeno, son causados, en su mayor parte, por la producción de electricidad a partir de fuentes fósiles. Estos son productos químicos potencialmente peligrosos para los seres humanos por inhalación, ingestión, e incluso por contacto. La potencia del Cáncer, por ejemplo, es un problema de esta categoría. Se mide en equivalentes de 1,4-diclorobenceno.

Agotamiento de la capa de ozono. Los gases que agotan el ozono causan daño a la capa de ozono estratosférico o la «capa de ozono». Existe una gran incertidumbre acerca de los efectos combinados de diferentes gases en la estratosfera, y todos los compuestos clorados y bromados que son lo suficientemente estable como para llegar a la estratosfera pueden tener un efecto. CFCs, halones y HCFC son las principales causas de la disminución del ozono. El daño a la capa de ozono reduce su capacidad para prevenir la radiación ultravioleta (UV) de entrar en la atmósfera terrestre, lo que aumenta la cantidad de luz cancerígena UVB que llega a la superficie de la Tierra. El modelo de caracterización ha sido desarrollado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés) y define el potencial de agotamiento del ozono de diferentes gases en relación con la sustancia de referencia clorofluorocarbono-11 (CFC-11), expresado en kg de CFC-11 equivalente.

Oxidación fotoquímica. El ozono es el protector en la estratosfera, pero en el nivel del suelo es tóxico para los seres humanos en alta concentración. El ozono fotoquímico, también llamado «ozono troposférico», está formado por la reacción de compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno en presencia de calor y la

luz solar. La categoría de impacto depende en gran medida de las cantidades de monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO), amonio y COVNM (no-metano compuestos orgánicos volátiles). EL potencial de creación de ozono fotoquímico (también conocido como el smog de verano) para la emisión de sustancias a la atmósfera se calcula con la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) modelo de trayectoria (incluido el destino) y se expresa mediante la unidad de referencia, kg de etileno (C₂H₄) equivalente.

2.4.2 SELECCIÓN DE CATEGORÍAS RELEVANTES

Como se comentó anteriormente, este análisis lo que busca es obtener información acerca del impacto ambiental de los Gases de Efecto Invernadero, ya que este fenómeno implica grandes consecuencias como el aumento de la temperatura media de la Tierra, la reducción de la superficie de los glaciares elevando así el nivel del agua en mares y océanos, inundaciones, sequías, impacto en la agricultura y ganadería, etc, por ello es importante tomar medidas y empezar a realizar cambios con respecto al calentamiento global.

Hay otras categorías que se tomarán en cuenta en el estudio como lo son los compuestos orgánicos volátiles, la eutroficación, el ozono troposférico y el consumo de energía primaria renovable y no renovable, ya que son las categorías más utilizadas en los estudios de ACV y en las Declaraciones Ambientales de Productos, permitiendo la comparación de los resultados de productos de construcción similares. [3, 24, 25, 26]

2.4.3 MODELOS PARA PREDECIR IMPACTOS DE GEI

Los impactos ambientales son calculados con factores de emisión. Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. Por lo general se pueden clasificar en dos tipos [5]

- Basados en procesos: En este caso se utilizan para estimar emisiones de fuentes puntuales y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados en encuestas o en balances de materia. En muchos países se han realizado múltiples estudios para determinar las tasas de emisión promedio de diferentes procesos que son fuentes de emisiones, puesto que con frecuencia no se requiere ni es económicamente factible hacer un muestreo en cada fuente de emisión, se usan los resultados de muestreos de «fuentes representativas» para desarrollar factores de emisión, los cuales se expresan como unidades de masa contaminantes emitidos por unidad de proceso.
- Basados en censos: Estos se utilizan generalmente para estimar emisiones de fuentes de área. Una de las desventajas de usar factores de emisión existentes basados en censos es que la mayor parte de ellos fueron desarrollados en EU o en Europa y es posible que no representen las condiciones socioeconómicas y las prácticas de manejos de procesos de emisión en México.

En la figura 2.8 se muestra un ejemplo para la estimación de factores de emisión tanto de los basados en proceso como de los basados en censos.

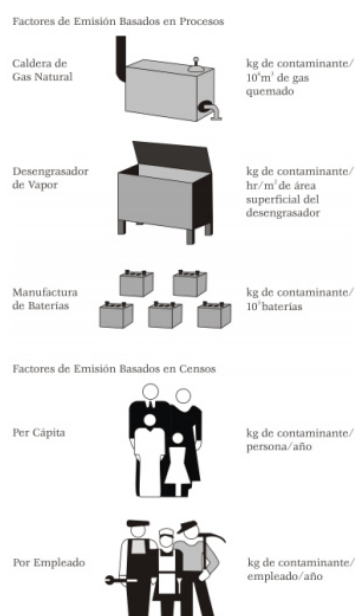


Figura 2.8: Ejemplos de factores de emisión [5].

Los factores de impacto utilizados para este análisis son estimados por las instituciones que generaron la base de datos de GEMIS, como por ejemplo el, Instituto de Ecología Aplicada en Estados Unidos, El instituto Internacional para el Análisis de Sostenibilidad y Estrategia en Alemania, La Asociación de Fabricantes de Plásticos en Europa, etc.

La manera en que se calculan los factores de emisión proviene de la metodología IPCC [39], sugiere la utilización de factores de emisión apropiados para cada caso, los factores no sólo varían de acuerdo con el tipo de combustible sino con la actividad en la que se aplique su proceso de combustión (e.g. generación de energía, procesos industriales, aplicaciones residenciales), y tecnología utilizada para tal fin (e.g. calderas, hornos, estufas). Generalmente se expresa como el peso del contaminante emitido por unidad de peso, volumen, energía o actividad, dependiendo el nivel escogido.

Por medio de la estequiometría de las ecuaciones químicas que rigen las reacciones de combustión (ver apéndice A), y conociendo la composición elemental de los combustibles, es posible calcular la cantidad de los productos obtenidos sobre una base dada de combustible.

En el esquema siguiente Figura 2.9, se puede resumir una de las metodologías aplicadas para el cálculo de los factores de emisión.

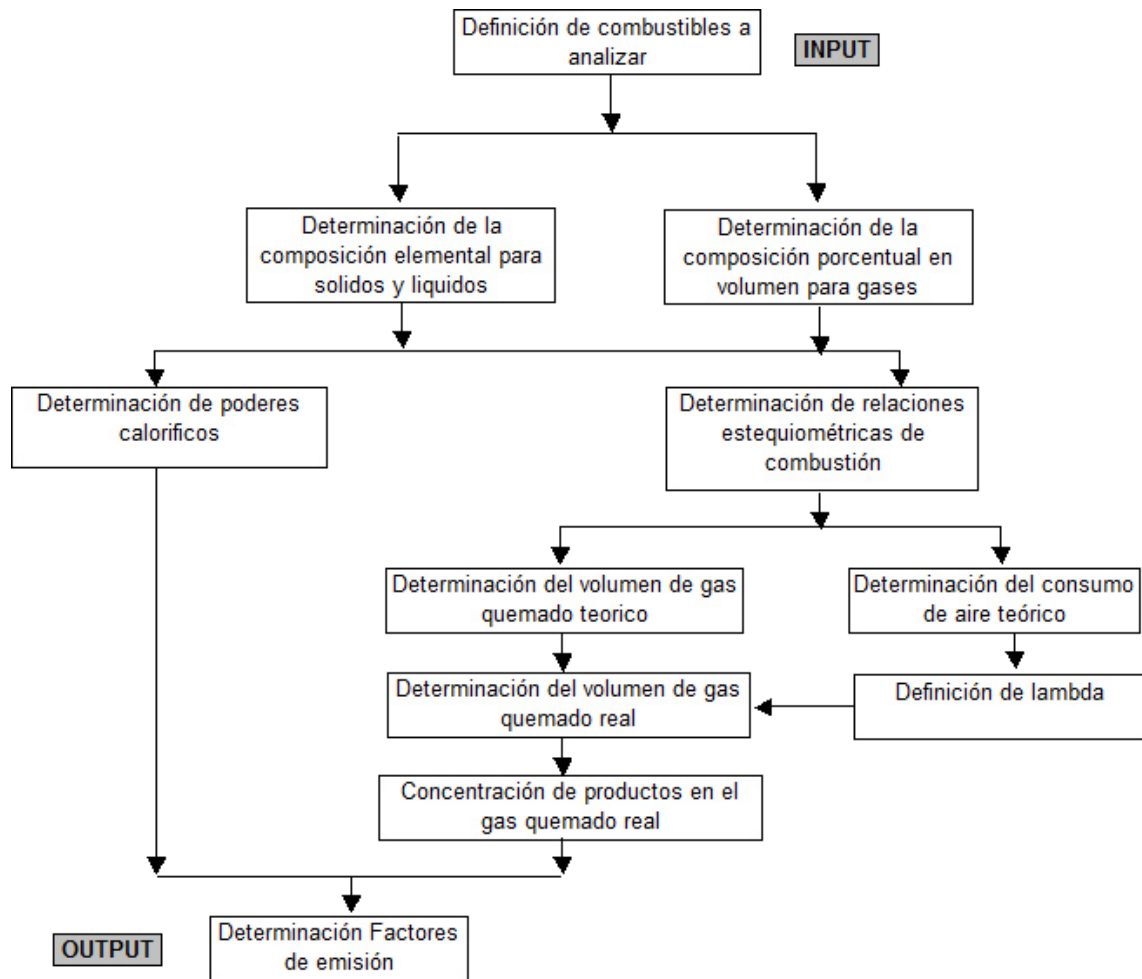


Figura 2.9: Esquema de metodología aplicada [6].

Un ejemplo de como el programa calcula los factores de emisión se muestra a continuación:

Dado que el análisis es puramente teórico, se asume una combustión completa de acuerdo a la siguiente estequiometría.



1. Se determina la composición elemental del combustible por ejemplo 80 % de C y 20 % de H_2 . y se propone una base de cálculo, en este ejemplo serán 100 Kg.

2. Se calcula la cantidad producida de CO_2 . Por la estequiometría sabemos que se produce un mol de CO_2 por cada mol de C

$$kg\ CO_2\ Producido = 80\ kg\ C * \left(\frac{44\ kg\ CO_2}{12\ kg\ C} \right) \quad (2.3)$$

$$kg\ CO_2\ Producido = \frac{293\ kg\ CO_2}{100\ kg\ combustible} \quad (2.4)$$

$$kg\ CO_2\ Producido = \frac{0.293\ kg\ CO_2}{kg\ combustible} \quad (2.5)$$

3. Enseguida se requiere conocer el volumen de gases quemados ya que este cálculo permite determinar la concentración de los diferentes compuestos en los gases de salida. Para este cálculo se emplea una de las fórmulas sugerida por Brandt tanto para sólidos y líquidos como para gases.

- Sólidos y líquidos

$$VGQ = 8.887 * C + 3.3174 * S + 20.9597 * H - 2.65405 * O + 0.7997 * (N + Cl + F) \quad (2.6)$$

Los valores para C, H, etc. están dados en porcentaje en peso (kg/kg), el volumen se expresa en m^3/kg de combustible.

- Gases

$$\begin{aligned} VGQ = & N_2 + CO_2 + 1.8838 * H_2 + 2.8 * CO + 6.6965 * H_2S \\ & + 8.5538 * CH_4 + 10.4048 * C_2H_2 + 13.3974 * C_2H_4 \\ & + 15.3340 * C_2H_6 + 20.3218 * C_3H_6 + 22.3114 * C_3H_8 \\ & + 27.6078 * C_4H_8 + 29.7424 * (C_4H_{10n} + C_4H_{10i}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

en donde i y n hacen referencia a i-butano o isobutano ($CH_3-CH_2-CH_2-CH_3$) y n-butano o butano normal ($CH(CH_3)_3$).

Los valores de los gases corresponden a la composición volumétrica (m^3/m^3), el volumen se expresa en (m^3/m^3) de combustible

Siguiendo con el mismo ejemplo:

$$VGQ = 8.887 * 0.8 + 20.9597 * 0.2 = 11.3m^3/kg \quad (2.8)$$

$$\text{Concentracion de } CO_2 \text{ en gases quemados} = 0.293/11.3 = 0.259kg/m^3 \quad (2.9)$$

4. Como último eslabón en la cadena de cálculos, antes de llegar al objetivo fundamental, que es el cálculo de los factores de emisión, lo constituye la determinación de los poderes caloríficos, también establecida mediante las relaciones sugeridas por Brandt, tanto el poder calorífico superior (HHV), como el poder calorífico inferior (LHV). Estos valores también se pueden encontrar ya tabulados.

■ Sólidos y Líquidos

$$\begin{aligned} HHV = & 34.8 * C + 93.8 * H + 10.44 * S \\ & + 6.28 * N - 10.8 * O + 2.5 * (9 * H) \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} LHV = & 34.8 * C + 93.8 * H + 10.44 * S \\ & + 6.28 * N - 10.8 * O - 2.5 * W \end{aligned} \quad (2.11)$$

en donde W es el contenido de agua. Si los valores para C, H, etc. están dados en porcentaje en peso (kg/kg), el poder calorífico se expresa en MJ/kg de combustible.

■ Gases

$$\begin{aligned} HHV = & 12.745 * H_2 + 39.819 * CH_4 + 70.293 * C_2H_6 \\ & + 63.429 * C_2H_4 + 58.473 * C_2H_2 + 101.234 * C_3H_8 \\ & + 93.576 * C_3H_6 + 134.128 * C_4H_{10n} + 133.256 * C_4H_{10i} \\ & + 125.919 * C_4H_8 + 12.633 * CO + 25.394 * H_2S \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$LVH = 10.784 * H_2 + 23.413 * H_2S + 12.633 * CO \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned}
& + 35.885 * CH_4 + 56.494 * C_2H_2 + 59.476 * C_2H_4 \\
& + 64.349 * C_2H_6 + 87.578 * C_3H_6 + 93.213 * C_3H_8 \\
& + 117.771 * C_4H_8 + 123.883 * nC_4H_{10} + 123.053 * iC_4H_{10}
\end{aligned}$$

Si los valores de los gases corresponden a la composición volumétrica (m_3/m_3), el volumen se expresa en MJ/m^3 de combustible.

5. Ahora a se puede proceder a realizar el cálculo de los factores de emisión. La relación que existe entre el poder calorífico del combustible y la concentración del producto analizado en los gases quemados, permite establecer el factor de emisión correspondiente. Para el ejemplo que estamos estudiando, dado que el poder calorífico del combustible es de 46,6 MJ/ kg y la concentración de CO_2 es de 0.259 kg/m^3 , el factor de emisión (FE) de CO_2 para el carbón (lambda = 1) sería:

$$FE(CO_2) = \frac{VGQ[\frac{m^3}{kg\ comb}] * Concentracion\ de\ CO_2[\frac{kg\ CO_2}{m^3}]}{poder\ calorifico[\frac{MJ}{kg\ comb}]} \quad (2.14)$$

$$FE(CO_2) = \frac{11.3 * 0.259}{46.6} = 0.063[\frac{MJ}{kg\ CO_2}] \quad (2.15)$$

Un ejemplo de los factores de impacto utilizados por el programa se muestran en las siguientes figuras:

En la figura 2.10 los resultados obtenidos son del cálculo con los valores pre-determinados de gemis, la composición del crudo es alemana al igual que la concentración de CO_2 en los gases quemados, ya que está tomado de procesos alemanes.

En la figura 2.11 los resultados ya están modificados a datos nacionales ya que mediante otros estudios se pudieron obtener las concentraciones de gases quemados e incorporarlas en el programa en la sección de Rohgas [10].

Emisión atmosférica	Rohgas [mg/m ³]	ppm	Factor de emisión kg/TJ	Factor de emisión kg/TJ	Emisión kg/h	Emisión kg/a
SO ₂	1712.46	584.34	5.81819E+2	4.94546E+2	2.09455E+2	1.36146E+6
NO _x	1000	243.59	1.69878E+2	1.44396E+2	6.1156E+1	3.97514E+5
HCl	0	0	0	0	0	0
HF	0	0	0	0	0	0
Ceniza de vuelo	42.86	0	1.45603E+1	1.23762E+1	5.2417	3.40711E+4
otras partículas	40	0	1.35902E+1	1.15517E+1	4.89248	3.18011E+4
CO	150	143.95	6.1156E+1	5.19826E+1	2.20162E+1	1.43105E+5
NMVOC	10.5	9.86	3.92418	3.33555	1.4127	9.18257E+3
H ₂ S	0	0	0	0	0	0
NH ₃	0	0	0	0	0	0
CO ₂	274794.15	138989.43	9.33628E+4	7.93584E+4	3.36106E+4	2.18469E+8
CH ₄	10.5	16.1	3.92418	3.33555	1.4127	9.18257E+3
N ₂ O	7	3.72	2.4972	2.12262	8.98993E-1	5.84346E+3

Figura 2.10: Emisiones del crudo con los datos base [4].

Emisión atmosférica	Rohgas [mg/m ³]	ppm	Factor de emisión kg/TJ	Factor de emisión kg/TJ	Emisión kg/h	Emisión kg/a
SO ₂	5862.52	2000.45	1.98649E+3	1.68852E+3	7.15137E+2	4.64839E+6
NO _x	438	106.69	7.42073E+1	6.30762E+1	2.67146E+1	1.73645E+5
HCl	0	0	0	0	0	0
HF	0	0	0	0	0	0
Ceniza de vuelo	42.48	0	1.43928E+1	1.22339E+1	5.18142	3.36792E+4
otras partículas	40	0	1.35538E+1	1.15208E+1	4.87939	3.1716E+4
CO	223.71	214.68	9.09639E+1	7.73194E+1	3.2747E+1	2.12856E+5
NMVOC	10.5	9.86	3.91367	3.32662	1.40892	9.158E+3
H ₂ S	0	0	0	0	0	0
NH ₃	0	0	0	0	0	0
CO ₂	259414.1	131210.28	8.79015E+4	7.47163E+4	3.16445E+4	2.05689E+8
CH ₄	10.5	16.1	3.91367	3.32662	1.40892	9.158E+3
N ₂ O	7	3.72	2.49052	2.11694	8.96587E-1	5.82782E+3

Figura 2.11: Emisiones del crudo con los datos modificados [4].

A lo largo de esta investigación los factores de impacto fueron revisados y actualizados con base en la información descrita en 2.3.1.2 y 2.3.2

2.5 ETAPA DE INTERPRETACIÓN

2.5.1 GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE ANÁLISIS

El primer escenario a ser analizado es una comparación entre los diferentes tipos de gases espumantes que se pueden utilizar en el proceso de extrusión del poliestireno. Los que se revisaron fueron los siguientes: se tomó como base el HFC (134a) por ser el más utilizado en el mercado para este tipo de proceso, y los demás que se contemplaron son usados en menor proporción como el Isobutano ($R-600_a$), Propano ($R290$), CFC (12) e HCFC (22). Esto con el fin de proponer alguna mejora en cuanto a emisiones emitidas y costo-beneficio entre los diferentes tipos sin llegar a dañar el producto final.

Para el segundo escenario se realizará una comparación entre los diferentes tipos de aislamientos térmicos utilizados en el mercado para edificaciones, principalmente esta nuestro aislante base, el Poliestireno Extruido (XPS), el cuál se comparará con Poliuretano (PUR), Poliestireno Expandido (EPS), Yeso y Lana Mineral.

A continuación se describirá cada aislante térmico y su proceso de producción.

- Poliestireno Extruido: las etapas del proceso estan descritas en la sección 2.2.2.1
- Poliestireno Expandido: la producción del EPS consta de 4 etapas principales en su manufactura más la etapa de extracción de la materia prima y se enlistan a continuación [3, 40].

1. Fase de materias primas: la manufactura del EPS tiene como materia prima principal los granos de poliestireno, los cuáles son almacenados en contenedores y suministrados al proceso por medio de bombas, así como polietileno de baja densidad, para que el proceso de expansión se pueda llevar a cabo se requiere de vapor de agua.

2. Preexpansión: el poliestireno expandible es introducido en unos preexpansores y calentado utilizando vapor de agua a una temperatura entre 80 y 100°C, de esta forma, el agente expansivo que lleva la materia prima permite que ésta se expanda bajando por tanto su densidad aparente. En el proceso de preexpansión, las perlas compactas de la materia prima se convierten en perlas de plástico celular con pequeñas celdillas cerradas que contienen aire en su interior. Las entradas relevantes en esta fase son granos de Poliestireno, electricidad, gas natural y agua.
3. Reposo intermedio y estabilización: cuando las partículas recién expandidas se enfrían, se crea un vacío interior que es preciso compensar con la penetración de aire por difusión. Para ello, el material se deja reposar en silos ventilados durante aproximadamente 48 horas. De este modo las perlas alcanzan una mayor estabilidad mecánica y mejoran su capacidad de expansión, lo que resulta ventajoso para la siguiente etapa de transformación.
4. Transformación: la perla preexpandida entra en un bloque o molde en el que se ve sometida a un proceso de soldadura, que se consigue mediante su sometimiento al vapor de agua durante un período que varía según el tipo de densidad aparente de la pieza a obtener, después de un proceso de estabilización sale de la máquina un producto homogéneo.
5. Corte/mecanizado: después de un periodo corto de enfriamiento, los bloques obtenidos pueden ser cortados en planchas. Dicho proceso se lleva a cabo mediante la utilización de una mesa de corte en tres dimensiones en la que hay dispuesto un sistema de hilos calientes que nos permiten hacer del bloque tantas planchas como sea posible de las medidas requeridas.

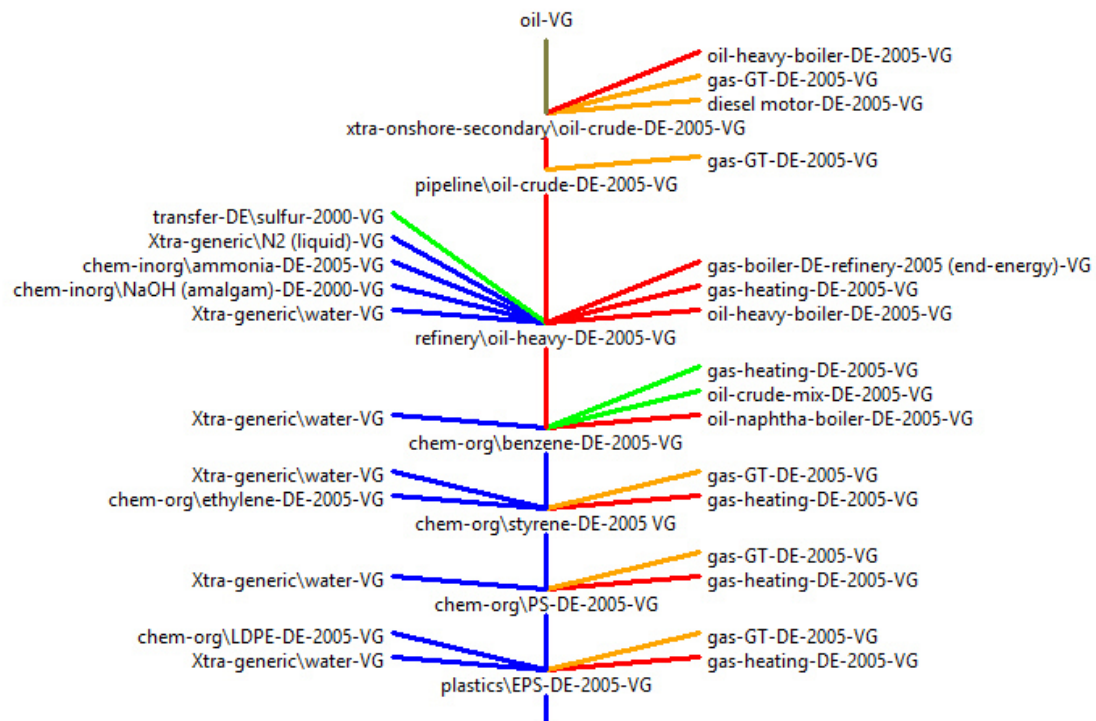


Figura 2.12: Cadena de proceso del EPS con datos mexicanos desde la obtención de materia prima [4].

- Yeso: la producción del Yeso consta de 3 etapas principales en su manufactura más la etapa de extracción de la materia prima y se enlistan a continuación [41, 42].
 1. Fase de materias primas: la materia prima principal en este proceso es el sulfato de calcio dehidratado, se empieza por su extracción y el acarreo, es necesario que el yacimiento se encuentre a poca profundidad para minimizar gastos, al igual se necesita de polietileno de baja densidad, agua, gas y electricidad.
 2. Trituración, selección y molienda: las rocas procedentes de la cantera se reducen por medio de quebradoras de quijadas, para que al alimentar al circuito de trituración tenga el tamaño adecuado a la abertura de la quebradora primaria. Para la pulverización se utilizan trituradoras cónicas

en grado fino o bien, molinos de bolas de acero. La separación de los productos por tamaños, se logra mediante el empleo de tromeles o cribas vibratorias. La roca pulverizada pasa mediante un elevador vertical de cangilones, a los silos o depósitos para almacenaje, este eslabón es uno de los más importantes porque los productos empiezan a adoptar los más altos requerimientos de calidad.

3. Calcinación: se realiza con el objetivo de remover humedad y para la preparación de la roca. La acción del calor sobre la roca de yeso produce una serie de transformaciones que dan lugar a la obtención de diversos tipos de yeso cocido, con propiedades físico-químicas diferentes que, si bien es verdad que todos son sulfato cálcico, sus usos son distintos. Los hornos de cocción son de diferentes tipos según el grado de perfección y temperatura que se desee alcanzar, es decir, qué tipo de yeso se quiere obtener.
4. Molienda, clasificación y envasado: una vez cocido el yeso se saca del horno y se transporta a la cámara de reposo o enfriamiento y de ésta pasa a los molinos refinadores. La proporción y distribución de los tamaños de partícula es un factor determinante con respecto a las propiedades del producto. Cuando se ha obtenido el yeso con el grado de finura deseado se procede al envasado del mismo, preferentemente en sacos especiales con objeto de protegerlo de la humedad.

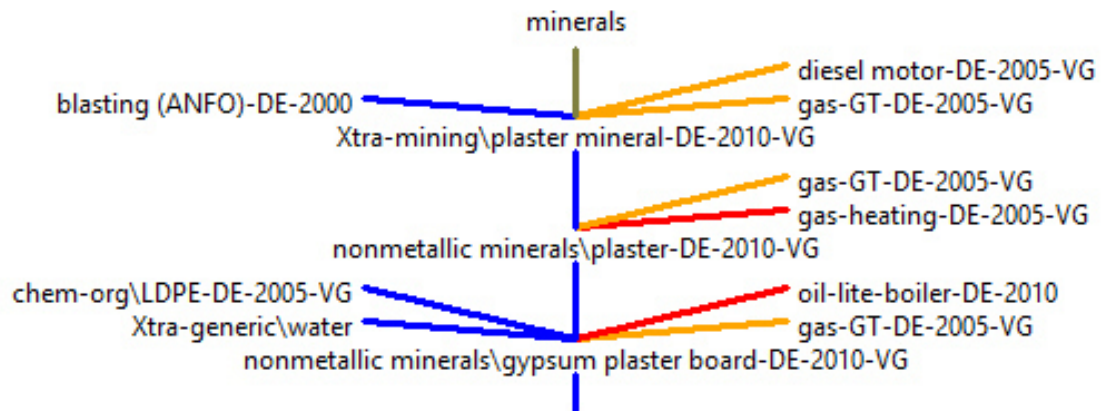


Figura 2.13: Cadena de proceso del yeso con datos mexicanos desde la obtención de materia prima [4].

- Lana Mineral. La producción de la lana mineral al igual que el yeso consta de 3 etapas principales en su manufactura, más la etapa de extracción de la materia prima y se enlistan a continuación [3, 43]:
 1. Fase de materias primas: las materias primas principales son la piedra caliza y el basalto, así como también se utiliza dolomita, agua, cemento, gas y combustible.
 2. Fusión: cuando las materias primas están propiamente medidas, son enviadas a un horno de fusión. Cuando están fundidas en el horno a altas temperaturas, usualmente entre $1300^{\circ}C$ y $1500^{\circ}C$, generan emisiones al aire.
 3. Hilatura y Ligadura: después del proceso de fusión, las gotas del horno de la masa fundida son hiladas en fibras a través de hilanderas giratorias. Una pequeña cantidad de agentes ligantes se inyecta dentro de las fibras, produciendo una piedra «gris».
 4. Curado y Corte: después del proceso de unión las fibras se curan a aproximadamente $200^{\circ}C$ y se corta tanto longitudinal como transversalmente al tamaño y la forma requerida.

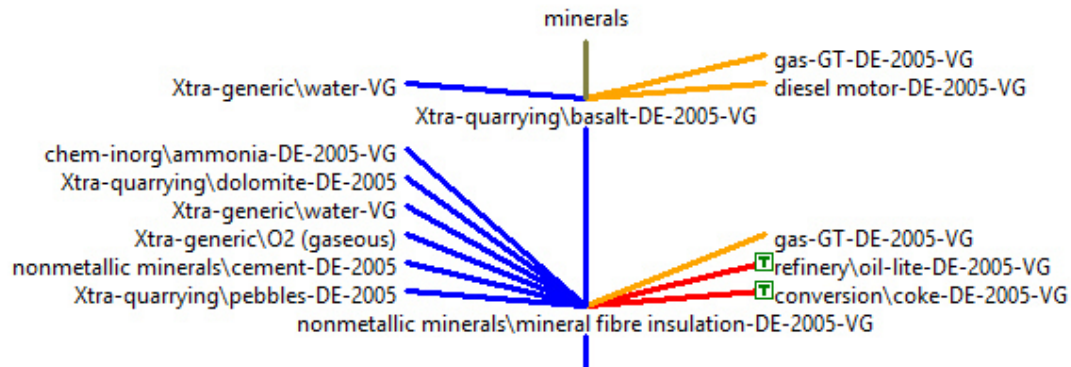


Figura 2.14: Cadena de proceso del lana mineral con datos mexicanos desde la obtención de materia prima [4].

- Poliuretano: la producción del PUR, al igual que el yeso y la lana mineral consta de 3 etapas principales en su manufactura, más la etapa de extracción de la materia prima y se enlistan a continuación[3, 44, 45].
 1. Fase de materias primas: las materias primas para este proceso son los polioles, los isocianatos y algún catalizador utilizado para acelerar la reacción.
 2. Mezclado, inyección y moldeo: en este primer paso de la manufactura del PUR, el poliol y el isocianato son retenidos como líquidos en tanques. El tanque de poliol contiene un agitador que mantiene el líquido fluido. Posteriormente, son conducidos a la máquina de inyección, que es la responsable de su mezcla, por aproximadamente 20 segundos. Después, la mezcla es reenviada a un molde y la reacción de polimerización ocurre hasta que la mezcla se vuelva sólida. Este proceso toma alrededor de una hora. Finalmente, después que el bloque es producido, es removido del molde y enviado a la cámara de climatización. Las entradas durante esta etapa son poliol, isocianato, cloruro de metileno, agua y energía eléctrica.
 3. Curado: después de que los bloques de PUR son producidos, pasan a una cámara de enfriamiento ya que la reacción es muy exotérmica, y

permanecen ahí un periodo de tiempo necesario para poderlos desmoldar.

4. Cortado y calibración: una vez que el proceso de curado esta completo, los bloques de PUR son reenviados a la máquina de corte para adquirir la forma de placas con la longitud deseada. El proceso de corte tarda alrededor de 15 a 30 minutos. Adicionalmente, las placas pueden ser enviadas a una máquina de calibración para ajustar su espesor.

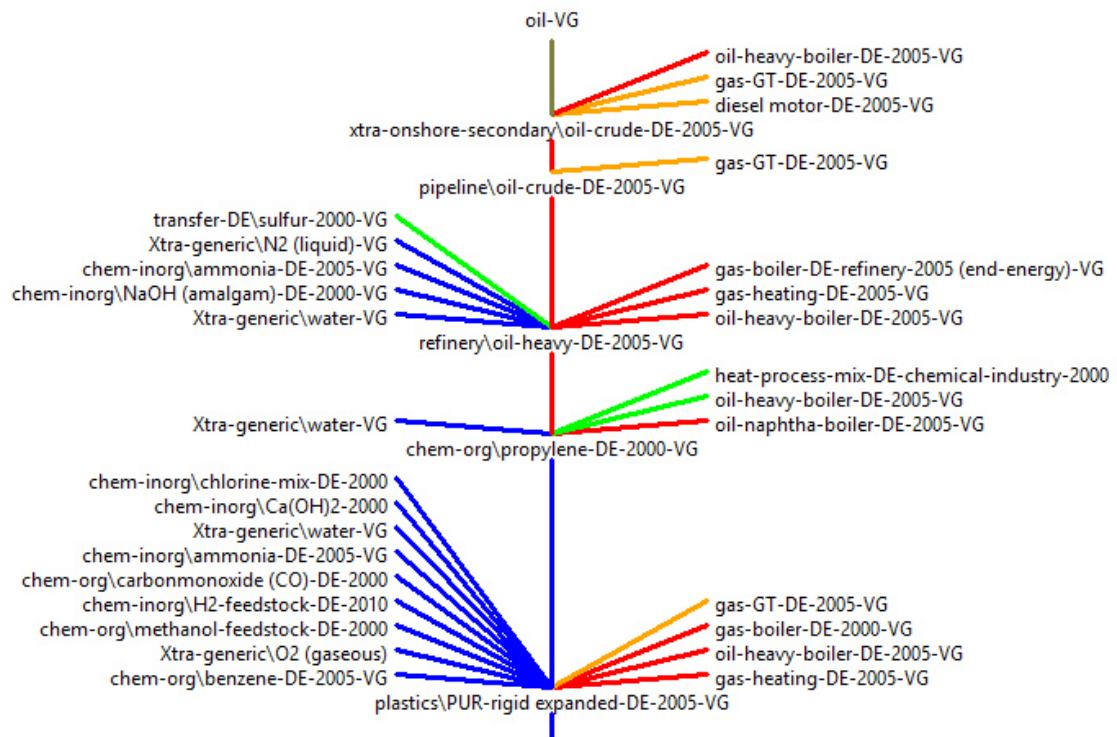


Figura 2.15: Cadena de proceso del PUR con datos mexicanos desde la obtención de materia prima [4].

Como un tercer escenario se compararán los diferentes aislantes: Poliestireno Extruido (XPS), Poliestireno Expandido (EPS), Poliuretano (PUR), Yeso y Lana Mineral explicados anteriormente sobre una misma base de tiempo que permita considerar su vida útil.

Aislante	Vida útil (años)	Fuentes
XPS	20	[46]
EPS	31	[47]
PUR	38	[48][49][50]
Yeso	50	[51]
Lana Mineral	60	[52]

Tabla 2.8: Vida útil en años de los diferentes tipos de aislantes a comparar

En la tabla 2.8 se muestra la vida útil esperada de cada aislante obtenida de diversos proveedores. Con esta información y debido a las diferentes magnitudes del tiempo, se propondrá de base una vida útil del edificio de 50 años, que es lo que normalmente marca la literatura, fijando esta cantidad se podrá realizar una comparación justa entre los diferentes tipos de aislamientos.

Ya que los aislantes difieren en su vida útil y empiezan a perder propiedades, se necesita reemplazarlos, esto genera impactos considerando de nuevo la generación de impactos por la producción del reemplazo.

2.5.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE ALTA INCERTIDUMBRE

En este apartado se identificará aquel escenario en el que el XPS sea el aislante de mayor impacto ambiental.

Como se explica en la sección dos, hay parámetros como la cantidad de energía eléctrica y otros combustibles fósiles que no se modificaron y se tomaron tal cuál de la base de datos de GEMIS, y no son representativos de la industria mexicana. Se pretenden duplicar estos parámetros que se dejaron fijos para ver como afectaría en las emisiones al ambiente.

2.5.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizará un Análisis de Sensibilidad para evaluar dos aspectos:

- El efecto de reducir 50 % las emisiones de las categorías de impacto identificadas anteriormente.
- Si el efecto no es suficientemente significativo, se evaluará que porcentaje de reducción se requiere para mejorar significativamente.

CAPÍTULO 3

EL ACV UTILIZANDO LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL GEMIS

GEMIS (Global Emission Model for Integrated Systems), por sus siglas en inglés es un software de dominio público para el cálculo del ciclo de vida y un modelo de análisis de flujos de materiales y base de datos que provee libremente el IINAS (The International Institute for Sustainability Analysis and Strategy), por sus siglas en inglés de Alemania.

Es usado en más de 30 países para el medio ambiente, costos y análisis de energía, materiales y sistemas de transporte. Dentro del programa, por un lado se encuentra las bases de datos para productos donde explica el uso de portadores de energía, materiales, emisiones, residuos y recursos; por otro lado, están los proceso, donde explica las bases de datos, por ejemplo, para plantas de poder, conversión de materiales, y sistemas de transporte, así como un área donde se introduce la creación de escenarios y como obtener resultados. Otra ventana es la de las referencias donde se identifica de donde fueron obtenidos los datos para la biblioteca. A continuación se describe a detalle lo antes mencionado.

3.0.4 DIAGRAMA DE CADENA DE PROCESOS

3.0.4.1 PRODUCTO

Los productos en GEMIS son entradas y salidas ligadas a un proceso. Estos son, dependiendo del tipo de proceso, portadores de energía (especialmente combustibles), emisiones, residuos, recursos o materiales y servicios.

Info

Domestic comment

English comment

process heat

Prozesswärme

References

Meta data

data quality	einfache Schätzung
Data entry by	Uwe R. Fritsche
Source	Oeko-Institut (Institut for applied Ecology)
Review Status	no review
Letzte Änderung	08/06/2004 03:15:16 p. m.
Language	Deutsch
GUID	{0E0B2450-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}

Data

Category	heat - process
variable costs:	0.0000000 €/TJ
energetical value	1.0000000
Efficiency of reference system	100.00000 %
specific weight	3.7911142 lb/kWh
Energy content	2.0934500 MJ/kg

Figura 3.1: Información del producto

En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de la información a detalle de los productos en el programa GEMIS, en este caso es calor suministrado al proceso obtenido por medio de la caldera de gas.

3.0.4.2 PROCESOS

Los procesos en GEMIS son actividades que convierten, transportan o emiten un producto. Las cadenas de procesos son generadas de enlaces entre procesos y representan una red de trabajo cuyos nodos (procesos) en conjunto proporcionan cierto beneficio (producto o servicio).

En esta sección se puede:

1. Seleccionar un proceso disponible en la base de datos. El programa cuenta con más de 9000 procesos para seleccionar el más adecuado al estudio a realizarse, así como el país de origen.
2. Modificar la información del proceso para adecuarla a las condiciones de análisis, ya que hay países que no se han estudiado pero hay otros que se pueden tomar de base para no partir de cero. Entre las modificaciones que se pueden realizar se encuentran:
 - Las etapas de proceso
 - Materiales precursores (materias primas)
 - Materiales auxiliares (agua, productos químicos, etc.)
 - Combustibles
 - Consumo de energía eléctrica.

De tal manera que nos permite crear una cadena de procesos que represente las condiciones de producción particulares para una región.

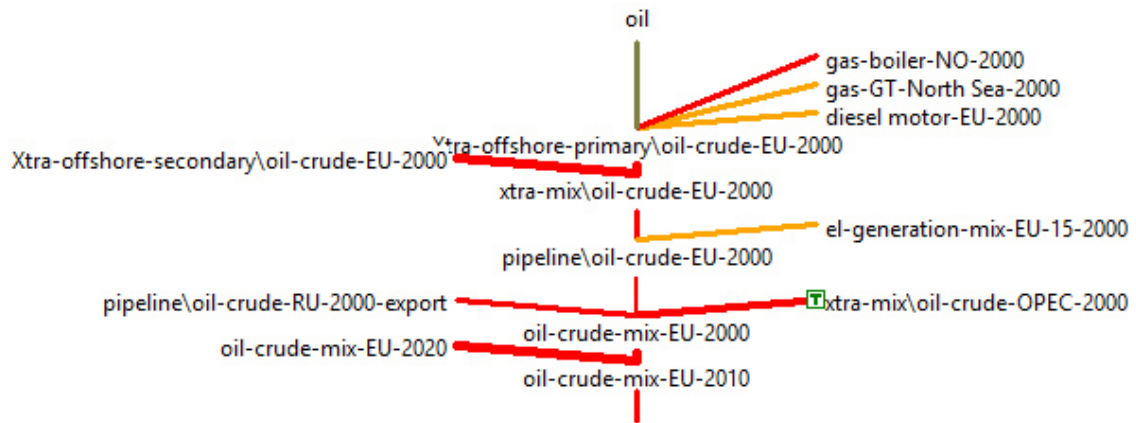


Figura 3.2: Proceso de producción de una mezcla de petróleo crudo en EU en el 2010 [4].

En la figura 3.2 se muestra un ejemplo de una cadena de proceso encontrada en la biblioteca de GEMIS, este proceso es la producción de una mezcla de petróleo crudo en Estados Unidos calculada para el año 2010. El siguiente diagrama posee ramificaciones que son parte esencial del proceso, las líneas amarillas y rojas indican los productos que entran en la cadena principal, que al posicionar el cursor sobre ellas te proporciona más información u otras cadenas de proceso.

3.0.5 ESCENARIO DE ANÁLISIS

En GEMIS se pueden crear escenarios de dos tipos:

1. Comparación de dos o más procesos con una base común de producción en unidades másicas.
2. Comparación de dos o más procesos con una base común de producción en unidades de energía.

3.0.6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

GEMIS permite presentar los resultados en forma de:

- Tablas

Results: greenhouse gas emissions				
Scope <input type="radio"/> local <input type="radio"/> all other <input checked="" type="radio"/> total				
Option [kg]	CO2 equivalent	CO2	CH4	N2O
el-grid local	6.06177E-1	5.77795E-1	7.37333E-4	3.25411E-5
powerplant-mix (national)	5.87707E-1	5.60391E-1	7.12474E-4	3.15868E-5
coal-DE-import-mix	8.88378E-1	8.35599E-1	1.61041E-3	4.1976E-5
lignite-DE	1.00863	9.99848E-1	2.80903E-5	2.71069E-5
gas-CC powerplant	4.05637E-1	3.80978E-1	7.83987E-4	1.69765E-5
gas-ICE-cogen 50 kW	4.33901E-1	3.98344E-1	1.2836E-3	1.1634E-5
gas-ICE-cogen 500 kW	4.0882E-1	3.75326E-1	1.20906E-3	1.09613E-5
gas-CC cogen 100 M/W	3.73993E-1	3.51113E-1	7.28585E-4	1.56516E-5
nuclear powerplant	5.5321E-2	5.28357E-2	7.10475E-5	2.36039E-6
hydro > 10 M/W	2.77223E-3	2.64907E-3	4.14924E-6	6.44131E-8
wind park onshore 2010	9.21593E-3	8.31974E-3	2.89966E-5	1.37242E-7
PV-mono	1.2909E-1	1.15588E-1	2.82958E-4	4.18727E-6
PV-multi	6.25005E-2	5.52166E-2	1.40079E-4	1.98581E-6
geothermal (ORC)	9.55747E-2	9.10676E-2	1.21663E-4	4.8704E-6
landfillgas-ICE	2.93745E-3	7.5168E-7	3.19649E-6	9.58654E-6
sewagegas-ICE-cogen	3.57492E-3	6.1148E-7	5.75637E-6	1.15114E-5
biogas-manure-ICE-cogen	6.35277E-2	3.73964E-2	8.91181E-4	1.25723E-5
biogas-maize-ICE-cogen	2.02263E-1	6.69371E-2	9.36617E-4	3.75182E-4
rapeseedoil-ICE-cogen	3.07944E-1	1.01123E-1	1.73289E-4	6.79299E-4

Figura 3.3: Ejemplo de resultados en forma de tabla para un escenario propuesto [4].

- Gráficas

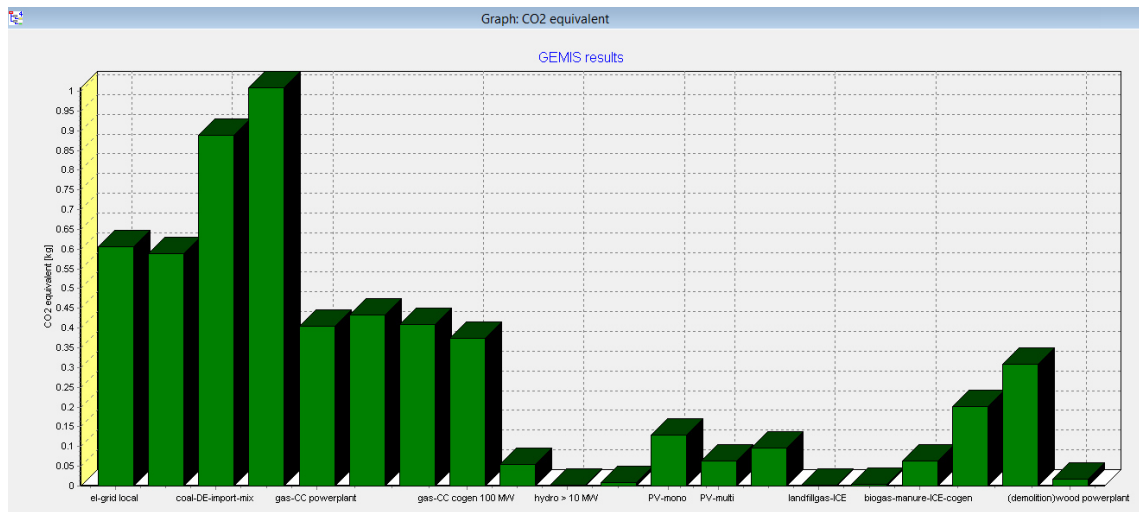


Figura 3.4: Ejemplo de resultados en forma de gráfica para un escenario propuesto [4].

Las gráficas que genera GEMIS permite comparar:

- Una categoría de impacto en varios procesos.
- El efecto combinado de costos e impactos ambientales en dos o más procesos.
- Categorías económicas (costos).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 CATEGORÍAS DE IMPACTO ASOCIADAS A LA PRODUCCIÓN DE XPS

Los resultados del ACV del XPS base que utiliza como gas espumante el HCFC22, se muestran en esta sección. En la Tabla 4.1 y la Figura 4.1 se muestran los impactos ambientales de la producción de XPS por u.f (1.13 kg), los resultados están divididos en etapas de producción siendo E1. Extracción de materias primas y E3. Proceso de manufactura, pero no se incluyeron las etapas E2 y E3.1, que tienen que ver con el transporte y el empaquetado, respectivamente, porque el modelo existente de GEMIS no los consideró para esta fase.

Categoría de Impacto	Unidad	Total	Materia Prima	Producción
Calentamiento Global	CO ₂ eq (kg)	2.86478	1.50484	1.3599
Acidificación	SO ₂ eq (kg)	8.6899E-2	-2.5909E-3	8.9490E-2
Ozono Troposférico	TOPP eq (kg)	2.8836E-1	5.8279E-2	2.3E-1
Energía primaria no renovable	(kWh)	17.866	6.101	11.764
Energía Primaria Renovable	(kWh)	2.4933E-2	6.2740E-3	1.8659E-2

Tabla 4.1: Categorías de impacto asociadas a la producción de XPS por u.f (1.13 kg) [4].

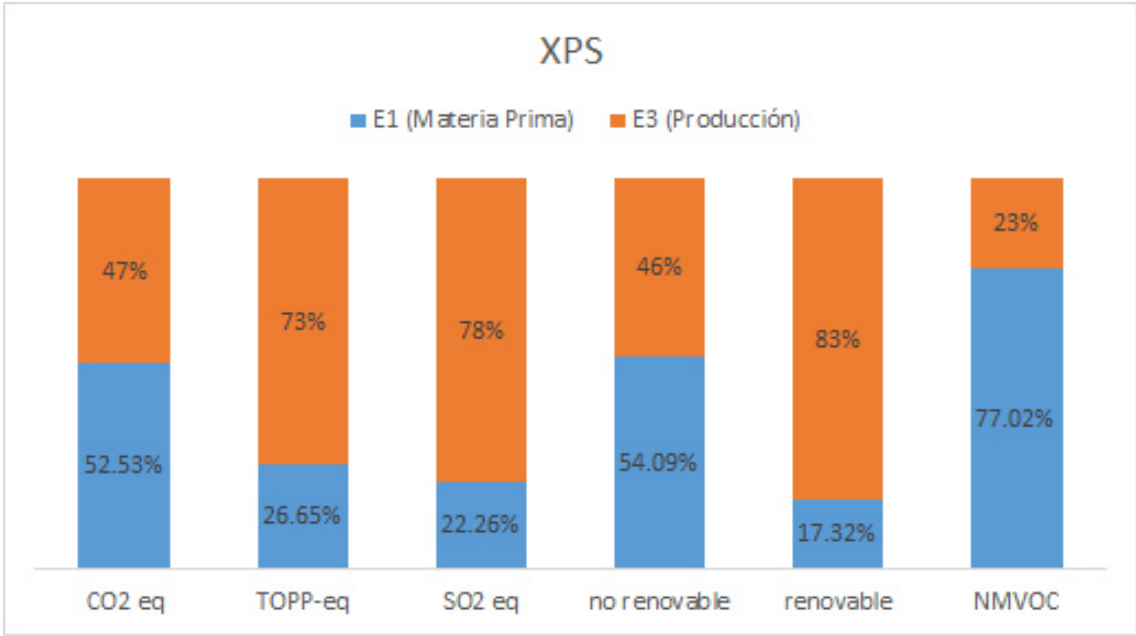


Figura 4.1: Contribución relativa a las categorías de impacto de la producción de XPS por unidad funcional [4].

Se puede observar como en las emisiones de CO2 eq, NMVOC y los no renovables tiene mayor impacto la extracción de materia prima, mientras que en las emisiones de ozono troposférico, acidificación y renovables hay un mayor impacto en el proceso de manufactura del panel de aislamiento.

Con respecto a la literatura en la Tabla 4.2 se pueden observar los diferentes resultados para varios estudios comparativos, en los cuáles se incluía el XPS, llegando a la conclusión que nuestros resultados están dentro del orden de magnitud de otros estudios. Las diferencias pueden derivar de la energía utilizada para calentar, la unidad funcional, que aunque no varía mucho, puede llegar a generar algún cambio, así como el empleo de fuentes de energía renovables. No en todos los estudios se incluían las mismas categorías de impacto por lo que esa información se quedó en blanco.

Impacto	GEMIS	[24]	[15]	[3]
CO ₂ eq (kg)	4.46	5.21	1.18	4.96
SO ₂ eq (kg)	1.29E-1	1.7E-2	0.2E-2	1.8E-2
TOPP eq (kg)	2.3E-1			
No renovables (kWh)	12.78	26.88		28.16
Renovables (kWh)	1.36E-2	36E-2		47.5E-2

Tabla 4.2: Comparación bibliográfica del ACV del XPS

4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO

En esta sección se muestran los resultados de los diferentes escenarios a analizar, empezando por el análisis del cambio de gas espumante, como se comentó anteriormente el análisis comenzó con el gas R134a , y le siguieron TCM, R600a, R290, CFC 12 y HCFC 22. En la segunda parte se hizo el análisis de los diferentes tipos de aislantes térmico que para este estudio se utilizaron XPS, EPS, lana mineral, yeso y poliuretano. En la tercera y última parte se contemplan los mismos aislantes mencionados anteriormente pero proyectados a 50 años de vida útil del edificio con lo que se pueden ver los beneficios a largo plazo de su uso.

4.2.1 AGENTES ESPUMANTES

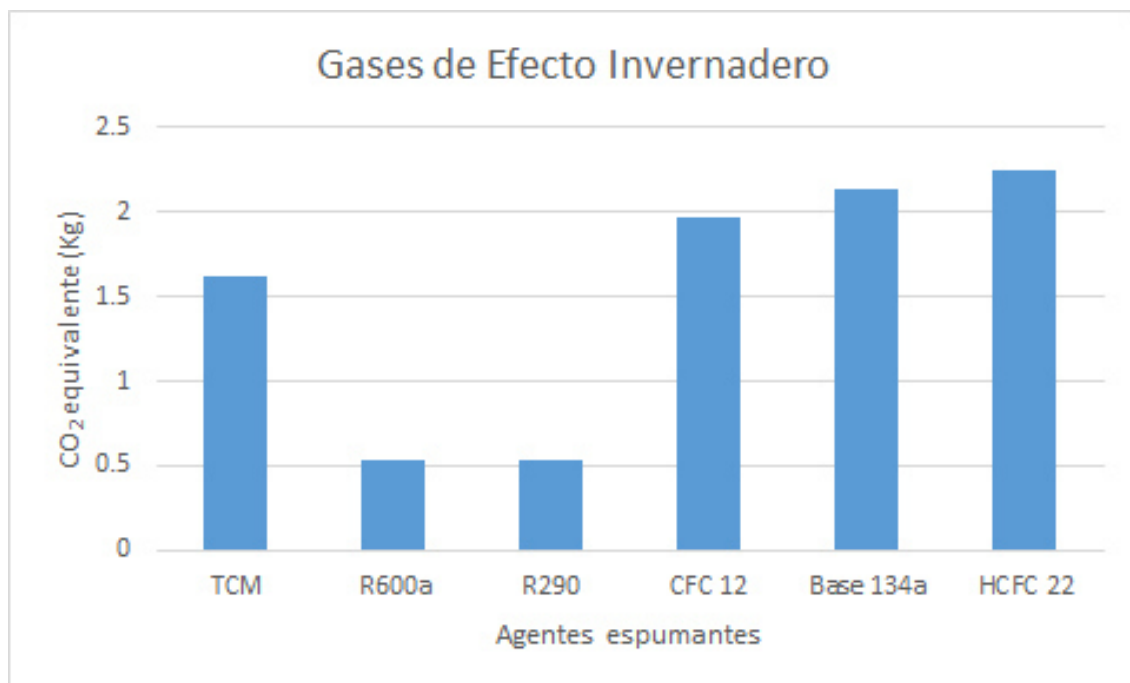


Figura 4.2: Comparación de las emisiones de CO_2 eq entre los diferentes tipos de agentes espumantes que se pueden utilizar [4].

En la figura 4.2 se puede observar el comportamiento similar del agente espumante R600a y R290 en la baja generación de gases de efecto invernadero, siendo el primero el de mejor rendimiento en esta categoría. El que posee el peor rendimiento es el HCFC 22, seguido del 134a, ya que sus poderes de calentamiento global son de los más altos. Por tal motivo, desde el 1ero. de enero del 2004, se prohibió la manufactura de los refrigerantes con base en HCFC debido a su alta toxicidad y por ser altamente perjudicial a la capa de ozono.

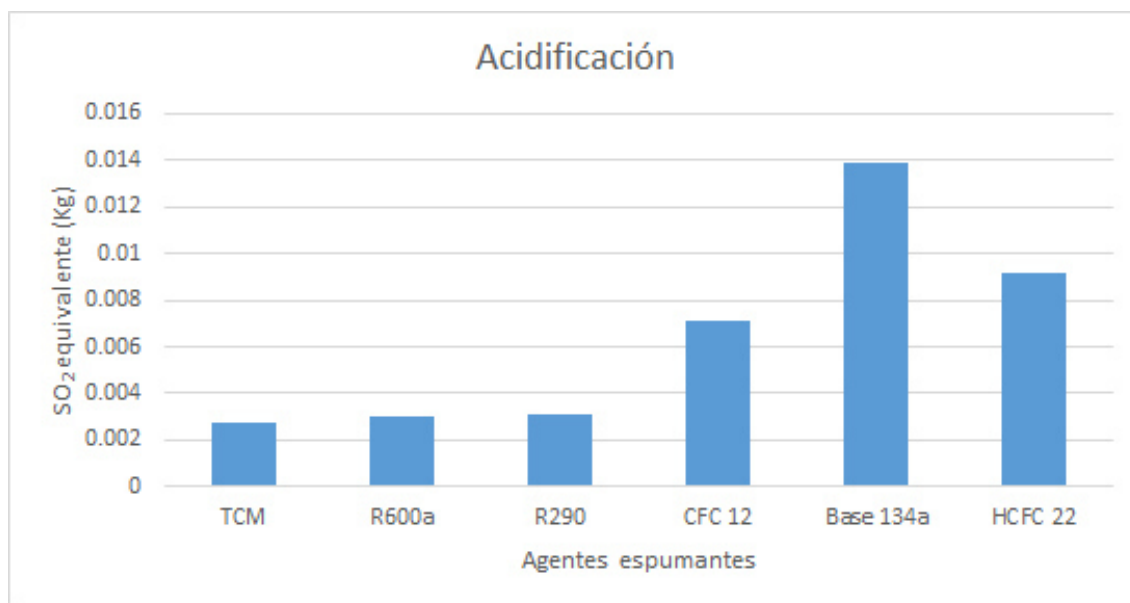


Figura 4.3: Comparación de las emisiones de SO_2 eq entre los diferentes tipos de agentes espumantes que se pueden utilizar [4].

En la figura 4.3 al igual que en la figura 4.2 el R600 y R290 siguen teniendo los índices más bajos en cuanto a emisiones de SO_2 , esto debido a que en su producción consumen azufre en lugar de expedirlo al ambiente. Por otro lado el agente espumante 134a sigue siendo el más contaminante debido a que es el único de los gases que en su cadena de proceso contiene Cloruro de Sodio (NaCl) y Fluoruro de Hidrógeno (HF) los cuáles tienen un factor de emisión de los más altos. El HCFC 22 y el CFC 12, tienen una contribución media para esta categoría.

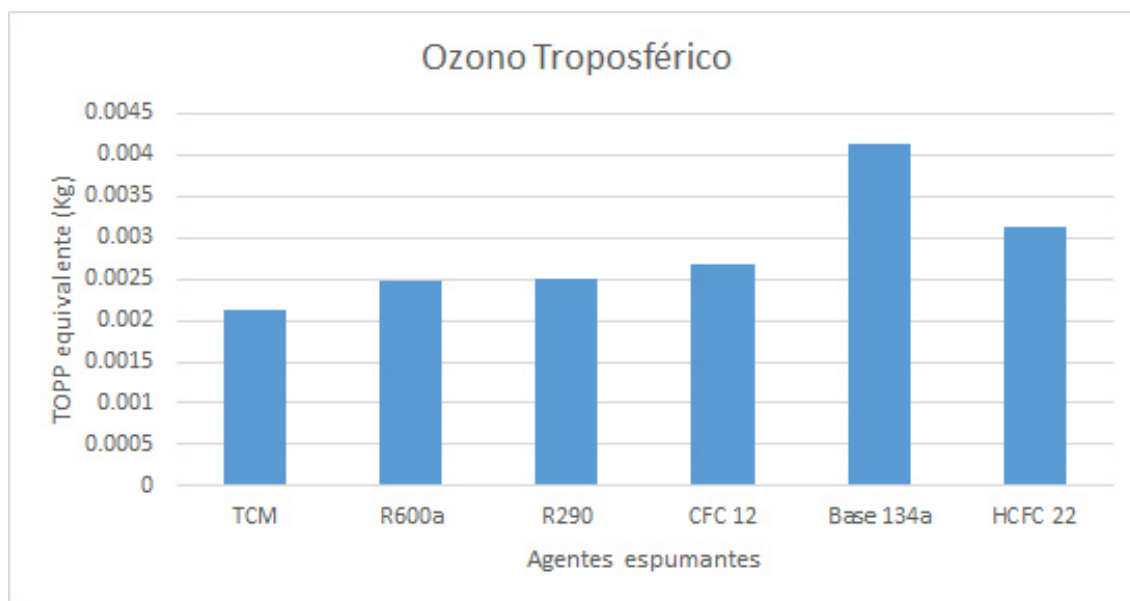


Figura 4.4: Comparación de las emisiones de TOPP eq entre los diferentes tipos de agentes espumantes que se pueden utilizar [4].

En la figura 4.4 el agente espumante 134a es el que sobresale por en cima de sus competidores en cuanto a los potenciales precursores del ozono troposférico, el 134a en sí no se considera un precursor de ozono troposférico pero dentro de su cadena de proceso contiene sales de cloro y ácidos de flour que al mezclarse producen compuestos fluoroclorados, unos subproductos altamente tóxicos y con elevados índices de contaminación.

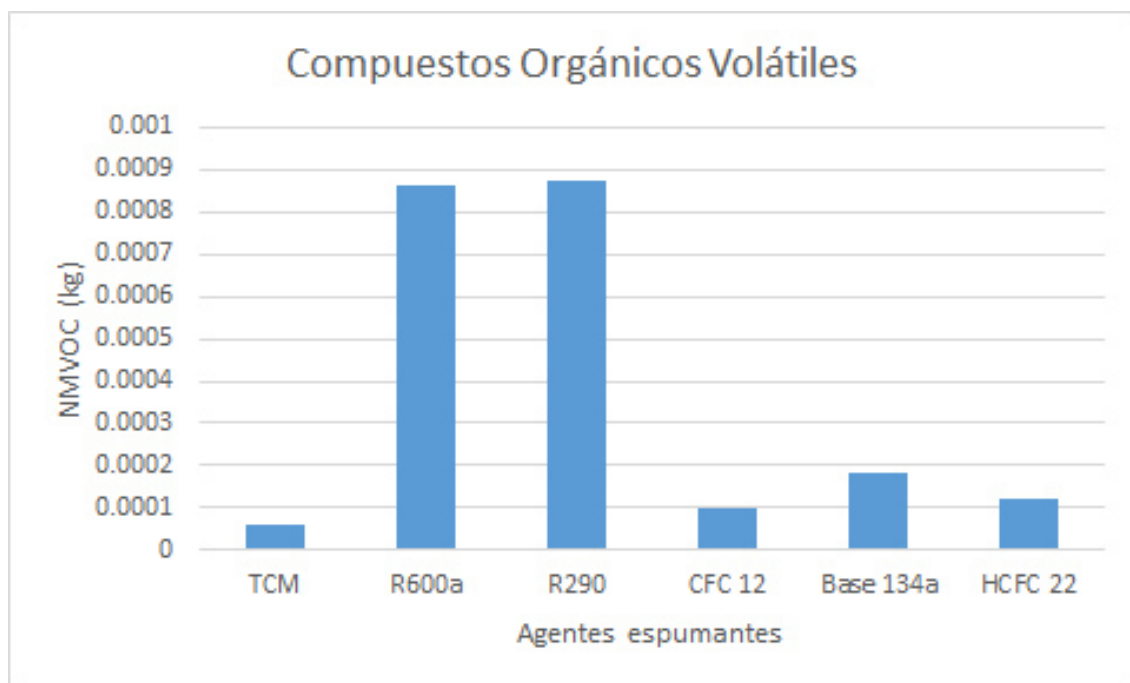


Figura 4.5: Comparación de las emisiones de NMVOC entre los diferentes tipos de agentes espumantes que se pueden utilizar [4].

A comparación de las figuras anteriores, donde los agentes espumantes R600a y R290 tenían los índices de contaminación más bajos, en la figura 4.5 son los dos que más sobresalen, debido a que son hidrocarburos ligeros altamente volátiles, por ser alcanos en fase gaseosa. Los demás agentes espumantes tienen una contribución casi nula a esta categoría de impacto.

4.2.2 AISLANTES

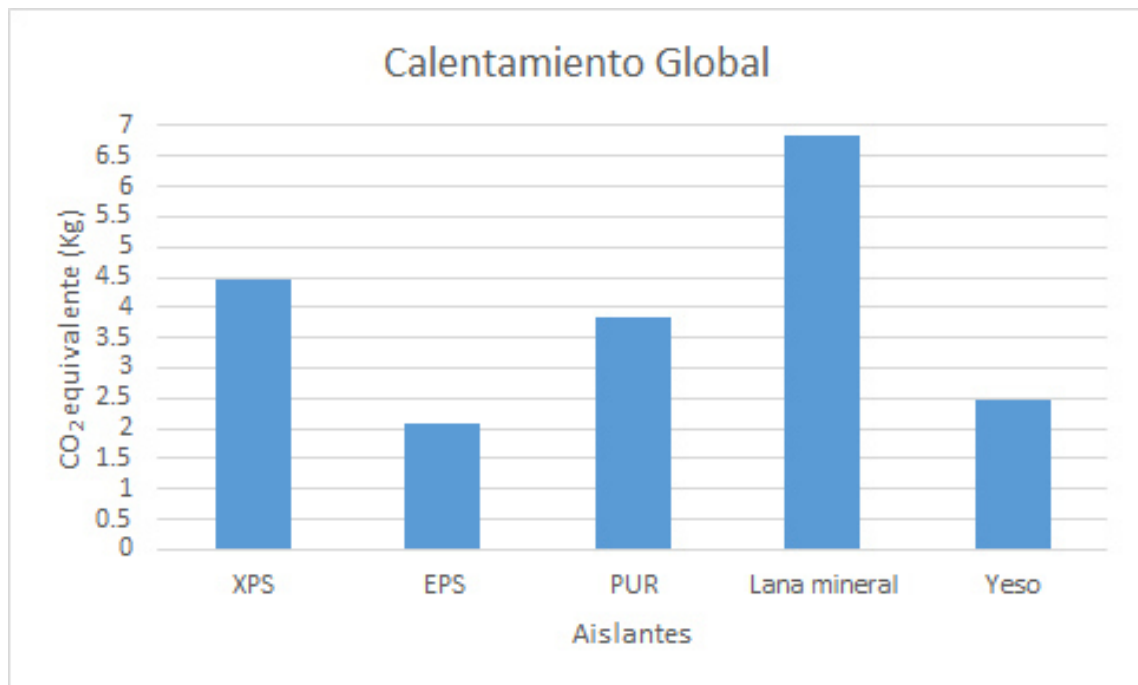


Figura 4.6: Gráfica de CO₂ equivalente para los aislantes comparados [4].

La figura 4.6 indica la contribución de los materiales de aislamiento hacia el potencial de calentamiento global, el EPS tiene el mejor rendimiento (2.09), seguido por yeso (2.46), PUR (3.83) y XPS (4.46). El peor rendimiento es atribuido a la lana mineral (6.84).

La producción de XPS tiene de los peores impactos en el potencial de calentamiento global debido a la producción de poliestireno.

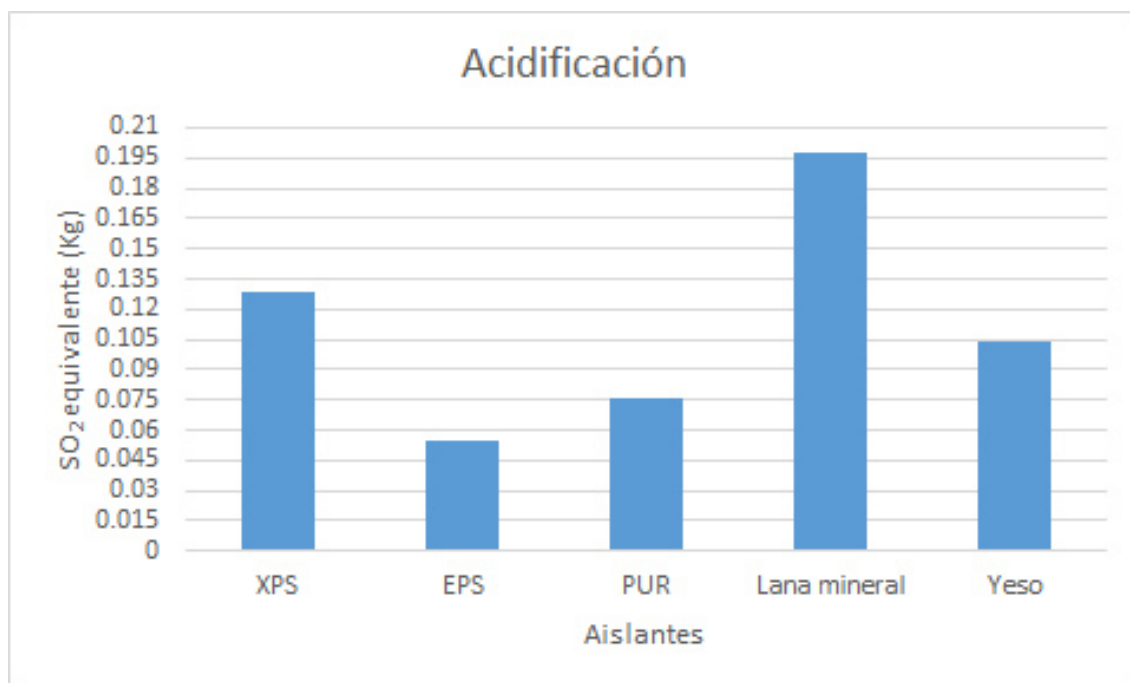


Figura 4.7: Gráfica de SO₂ equivalente para los aislantes comparados [4].

La contribución de los materiales aislantes hacia el potencial de acidificación se muestra en la figura 4.7, el mejor rendimiento es asignado al EPS ($5.481\text{E-}02$) seguido por el PUR ($1.979\text{E-}01$) y después el Yeso ($1.038\text{E-}01$). El peor rendimiento hacia esta categoría se le atribuye a la lana mineral ($1.979\text{E-}01$) seguido del XPS ($1.285\text{E-}01$).

La contribución del XPS a esta categoría está concentrada en la etapa A1 debido al consumo de poliestireno, la electricidad y el agente espumante.

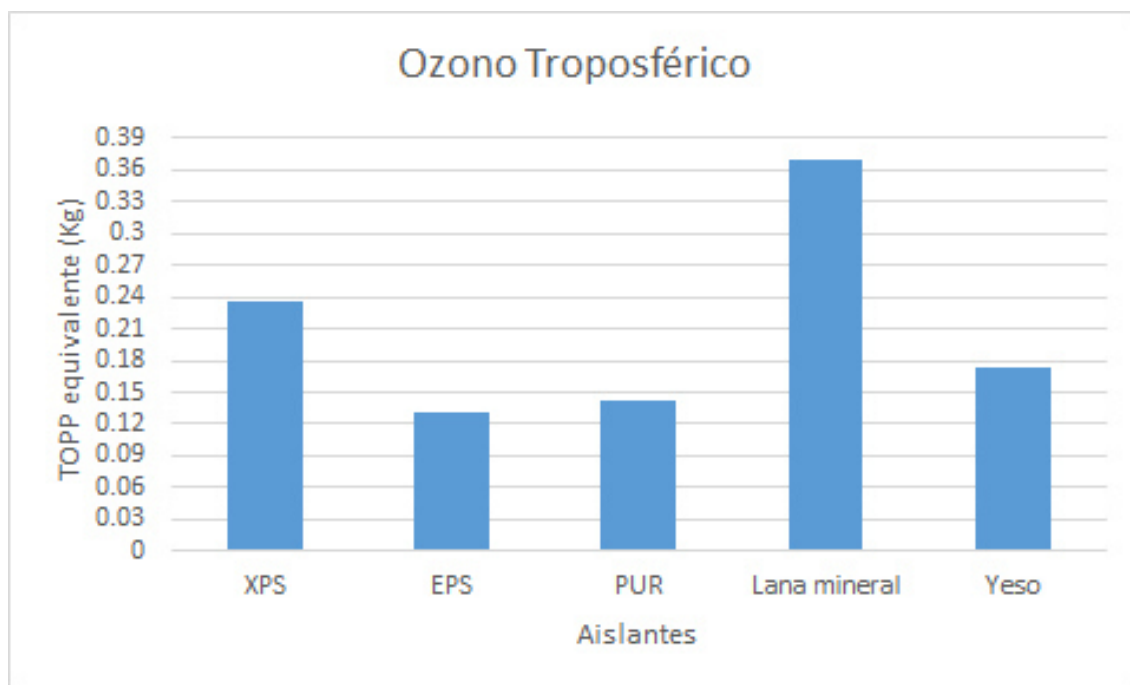


Figura 4.8: Gráfica de Ozono troposférico equivalente para los aislantes comparados [4].

En cuanto al ozono troposférico, podemos observar la figura 4.8, en donde el mejor rendimiento lo sigue obteniendo el EPS ($1.3039\text{E-}01$) seguido del PUR ($1.428\text{E-}01$) y después el yeso ($1.743\text{E-}01$). El peor al igual que en la acidificación lo posee la lana mineral ($3.66\text{E-}01$) seguido del XPS ($2.358\text{E-}01$). La alta contribución que posee la lana mineral a esta categoría de impacto se le atribuye a la fabricación del amoníaco por medio del proceso "Haber" que emplea altas presiones y temperaturas así como los catalizadores de amoníaco por ser productos complejos.

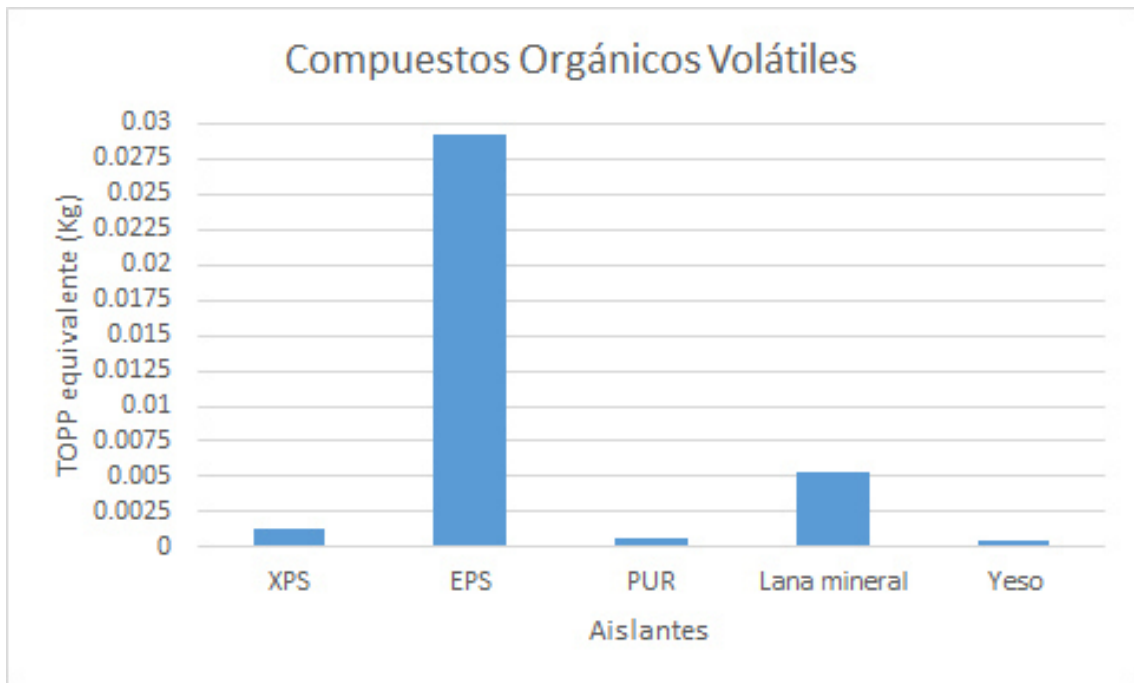


Figura 4.9: Gráfica de Compuestos orgánicos volátiles para los aislantes comparados [4].

Los resultados de la figura 4.9 nos revelan que el yeso ($4.04\text{E-}04$) tiene el mejor rendimiento para el potencial de compuestos orgánicos volátiles, seguido del PUR ($6.7\text{E-}04$) y después el XPS ($1.25\text{E-}03$). El peor rendimiento lo posee el EPS (0.029), siendo esta categoría la única en la cuál muestra esta tendencia. El comportamiento del EPS a esta categoría se debe a que proviene del benceno el cuál es muy volátil. Los demás aislantes no poseen nada parecido.

Categoría de Impacto	Unidad	XPS	EPS	PUR	Lana Mineral	Yeso
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	4.46312	2.0944	3.83818	6.8487	2.46022
Acidificación	kg SO ₂ eq	1.2856E-1	5.4812E-2	7.6018E-2	1.9795E-1	1.0380E-1
Ozono Troposférico	kg TOPP eq	2.3580E-1	1.3039E-1	1.4280E-1	3.6903E-1	1.7434E-1
No renovables	kWh	12.7814	6.0453	13.3309	23.0713	9.5011
Renovables	kWh	1.3767E-2	3.2367E-3	8.1808E-2	2.9696E-2	1.2163E-2

Tabla 4.3: Resultados de los materiales de aislamiento bajo estudio [4].

En la tabla 4.3 se resumen los resultados de las categorías de impacto para los diferentes aislantes bajo estudio. Dando con el mejor rendimiento en todas las categorías el EPS, y con el rendimiento mas bajo la lana mineral en cuatro de cinco categorías.

4.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

4.3.1 CALIDAD DEL GAS NATURAL

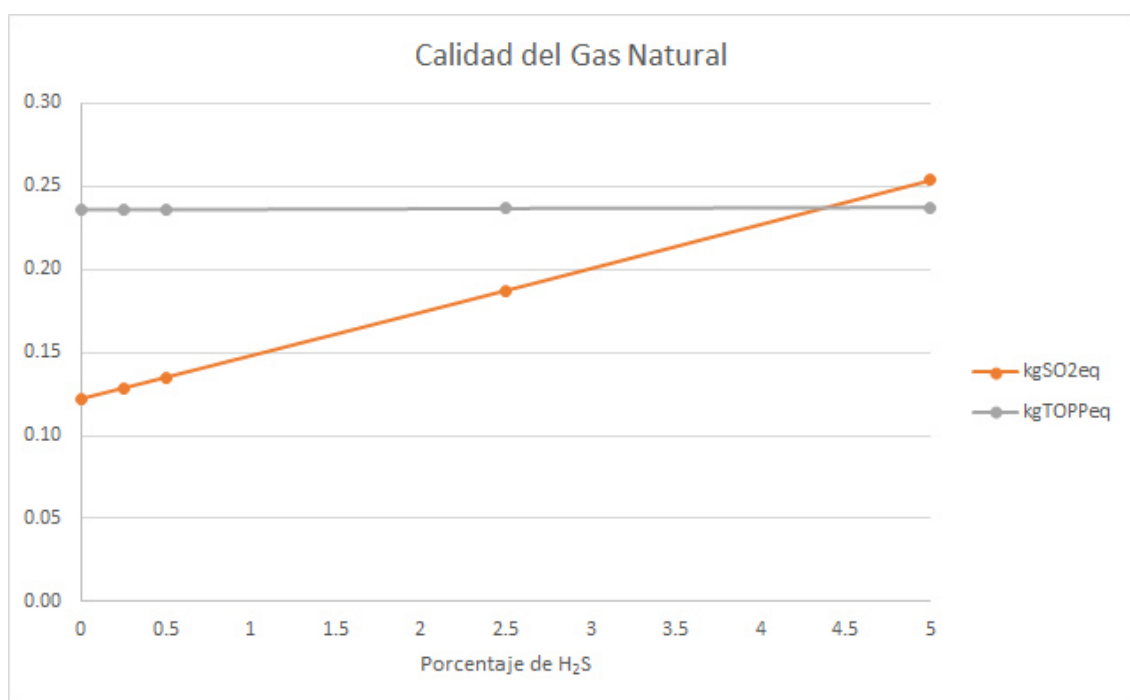


Figura 4.10: Gráfica para Ozono troposférico y Acidificación disminuyendo la calidad del Gas Natural [4].

Si se triplica el porcentaje de azufre en la gráfica de acidificación y ozono troposférico 4.10, se duplica la cantidad de impacto por acidificación, en total hubo un cambio del 107.53 % modificando el porcentaje de H₂S desde el 0 % al 5 %.

La figura 4.11 depende de la figura 4.10, ya que conforme vamos aumentando el contenido de azufre en el Gas Natural va disminuyendo la generación de CO_2 debido a que el dióxido de azufre es considerado un contaminante atmosférico pero igual contribuye al enfriamiento global. Esto quiere decir que el dióxido de azufre reacciona con el agua de la atmósfera para convertirse a un ácido sulfúrico; también considerado como un aerosol. Los aerosoles reflejan la radiación solar y así no permitir al sol calentar la tierra. Al duplicar la cantidad de azufre en el gas natural disminuye el CO_2 eq. en 0.56 % siendo una contribución demasiado pequeña en esta categoría.

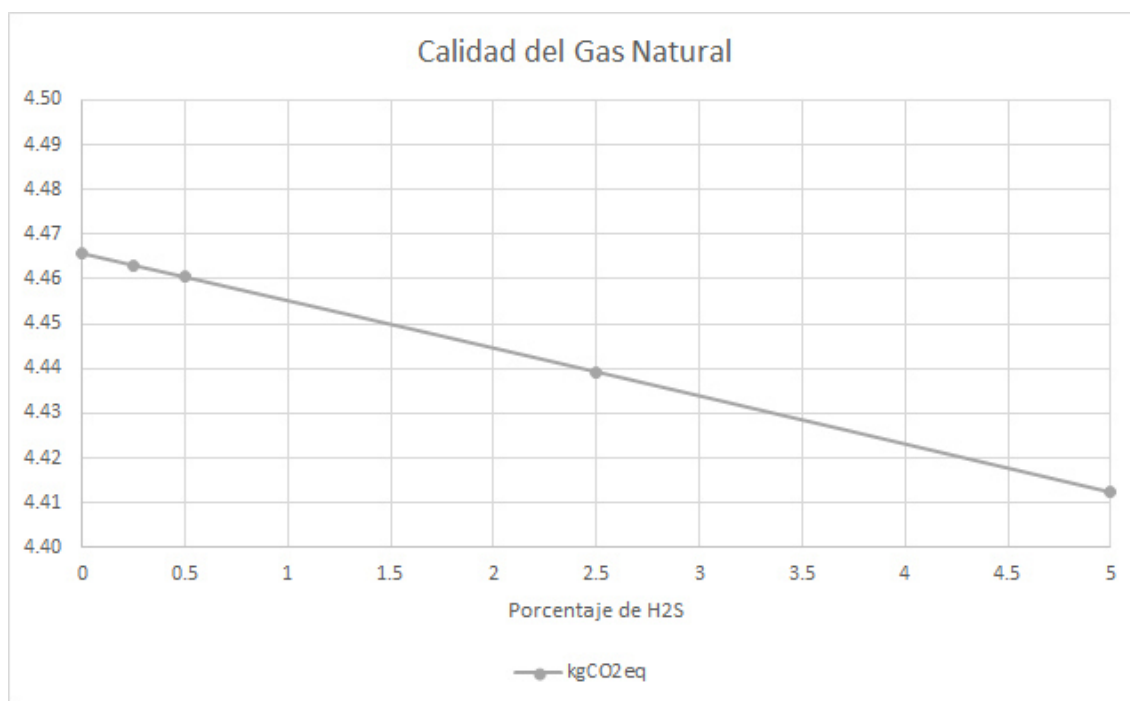


Figura 4.11: Gráfica para GEI disminuyendo la calidad del Gas Natural [4].

4.3.1.1 CALIDAD DEL COMBUSTÓLEO

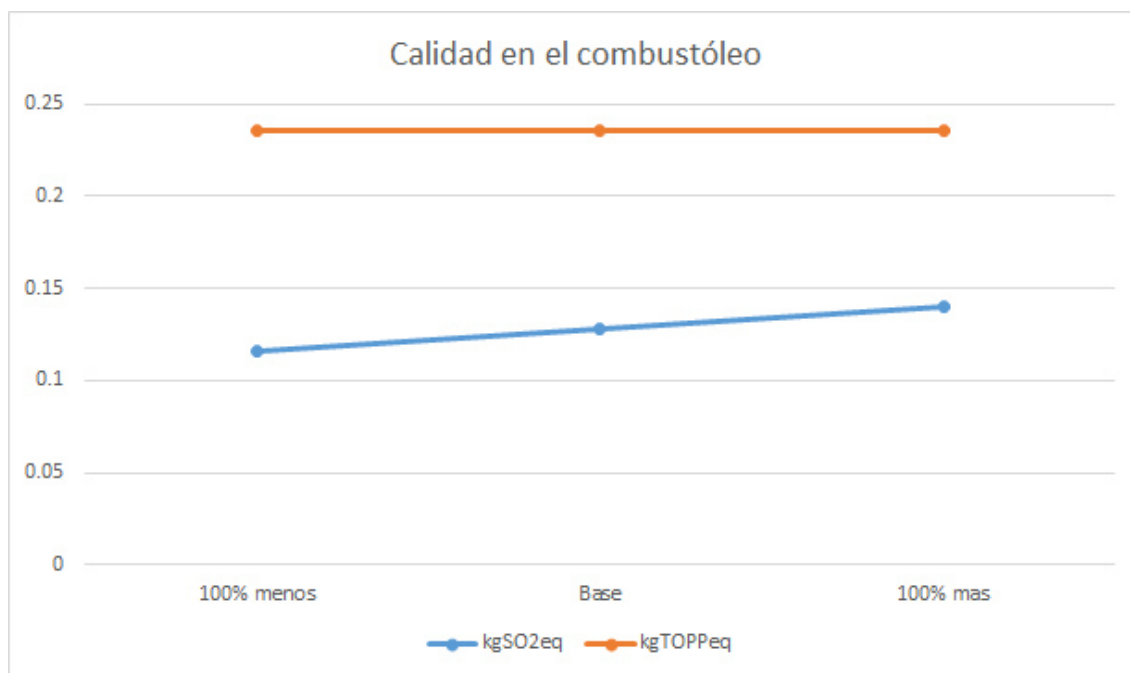


Figura 4.12: Gráfica de Ozono Troposférico equivalente y Acidificación, disminuyendo la calidad del combustóleo [4].

El cálculo de los factores de emisión de dióxido de azufre (SO_2) se basa en el contenido de azufre en el combustible. En la figura 4.12 no se aprecia un cambio significativo para las emisiones de TOPP al modificar la composición de azufre en el combustible (0.01 %), pero ya que las emisiones de SO_2 depende directamente del contenido de azufre en el combustible, se ve un cambio del 17% en total desde un contenido de azufre de cero hasta siete, disminuyendo y aumentando en un 100 % el original.

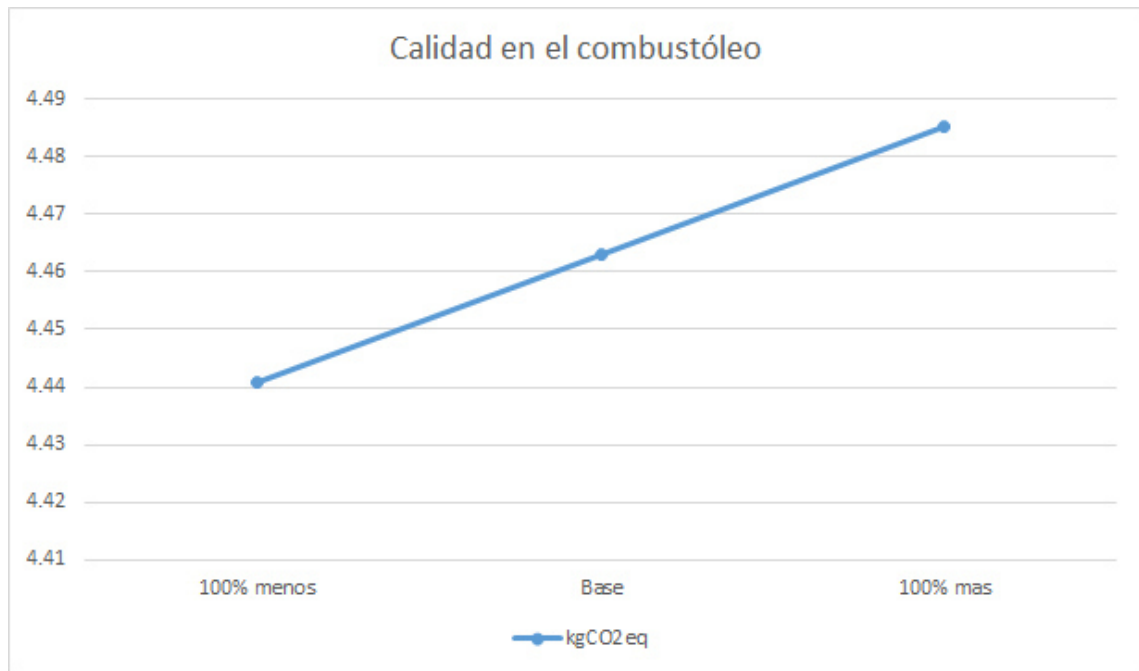


Figura 4.13: Gráfica para GEI disminuyendo la calidad del Combustóleo [4].

En la figura 4.13, al disminuir la calidad del combustóleo variando el contenido de azufre, se ve un cambio mínimo del 0.99 %. Pasando de 0 % azufre (4.44) hasta un aumento del 100 % (4.48). No hay mucha información que relacione la producción de SO_2 con el impacto en el calentamiento global (CO_2 eq.), pero hay varios compuestos que contienen azufre y son los que poseen los potenciales de calentamiento global mas altos. Aún así el cambio es casi insignificante y se pusiera despreciar.

4.4 ANÁLISIS DE LOS BENEFICIOS DEL XPS COMO PARTE DE LA EDIFICACIÓN SOCIAL ABIERTA Y SUSTENTABLE

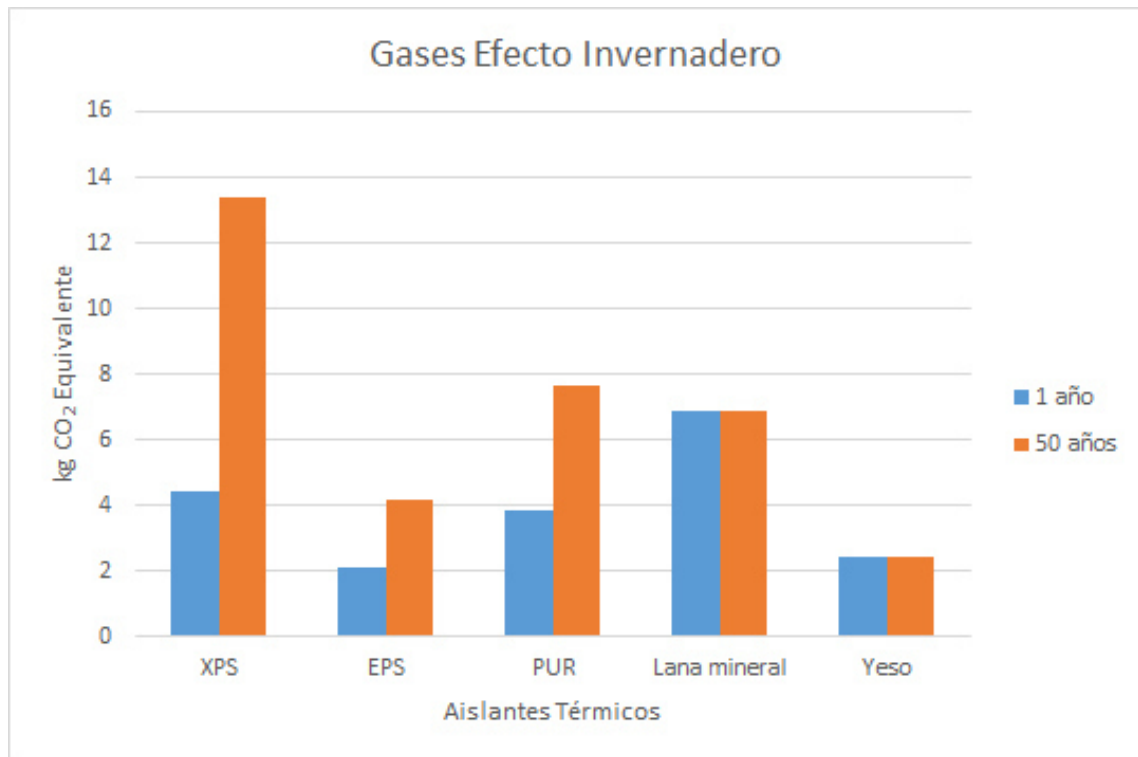


Figura 4.14: Gráfica para GEI en la vida útil de los aislantes [4].

En la figura 4.14 se plasma la contribución de los diferentes aislantes hacia el calentamiento global, después de 50 años de vida útil que se tomó de base para una edificación. Se puede observar como la lana mineral y el yeso permanecen igual, esto se debe a que tienen una vida útil de 50 y 60 años respectivamente por lo que no se necesita reemplazarlos. Por otro lado la vida útil del XPS es de 20 años por lo que necesita ser cambiado tres veces para respetar la vida útil de la edificación y seguir cumpliendo con su función. Asimismo, el EPS y el PUR deben ser cambiados dos

veces ya que pierden sus propiedades alrededor de los 30 años.

Las demás categorías de impacto se muestran en las figuras 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18, se puede apreciar que siguen la misma tendencia que el calentamiento global, debido a que la u.f cambio a tener de base 50 años en vez de un año, por lo que se multiplicó el aislante por la cantidad de veces que se necesitaba ser reemplazado. Esto significa que para la acidificación, ozono troposférico y recursos renovables y no renovables se tuvieron que duplicar los resultados obtenidos en el capítulo anterior para el EPS y el PUR, y se triplicaron para el XPS.

Por lo que se puede apreciar en los resultado el yeso es la opción más viable para un aislamiento térmico a largo plazo, por que no pierde sus propiedades, el EPS es la segunda mejor opción. En cambio el XPS, se tendría que cambiar tres veces en la vida de la edificación generando mayores impactos ambientales, aún más que competencia la lana mineral que en la fabricación de un panel era la opción menos viable, esto a su vez traería mayores costos.

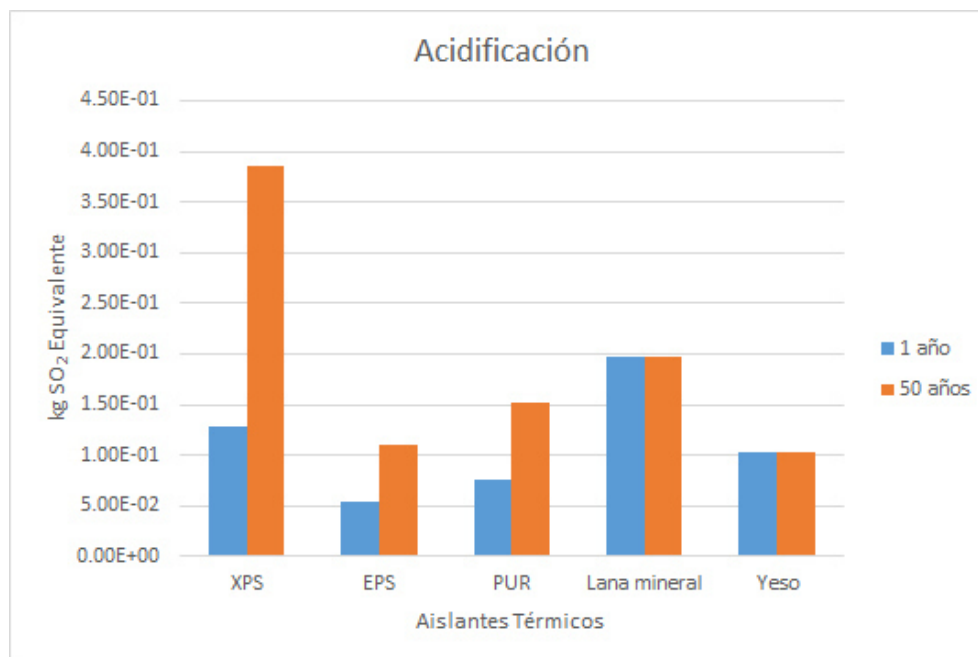


Figura 4.15: Gráfica para Acidificación en la vida útil de los aislante [4]s.

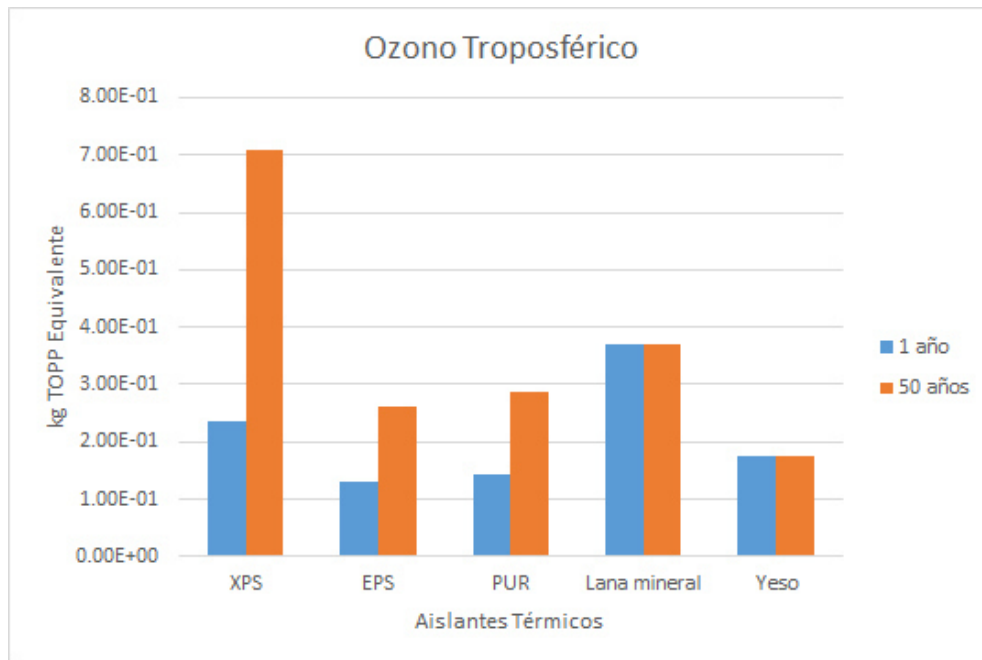


Figura 4.16: Gráfica para Ozono Tropoférico en la vida útil de los aislantes [4].

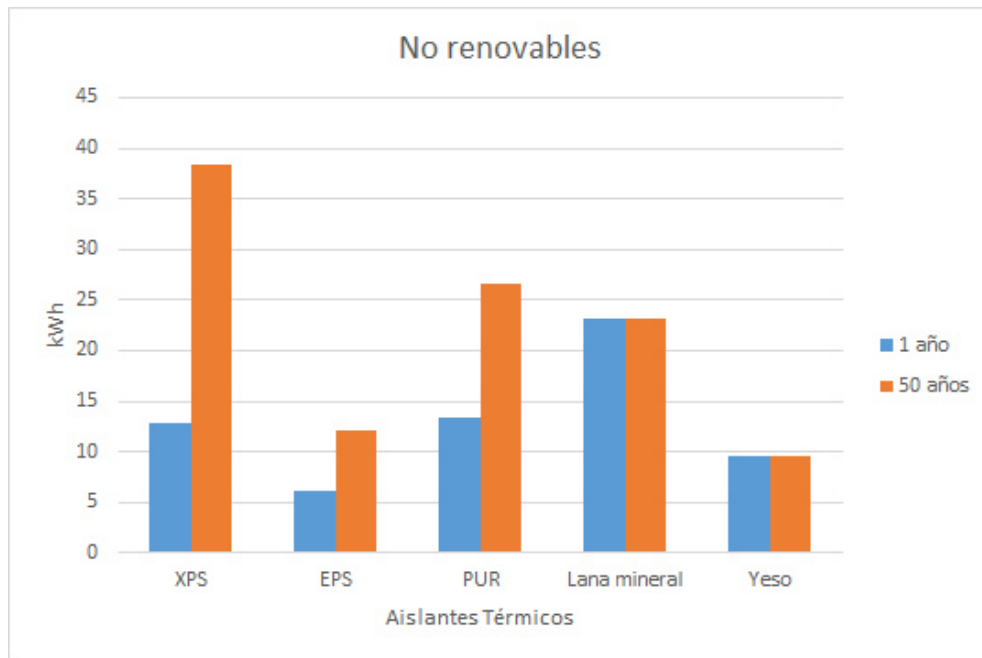


Figura 4.17: Gráfica para Uso de recursos No Renovables en la vida útil de los aislantes [4].

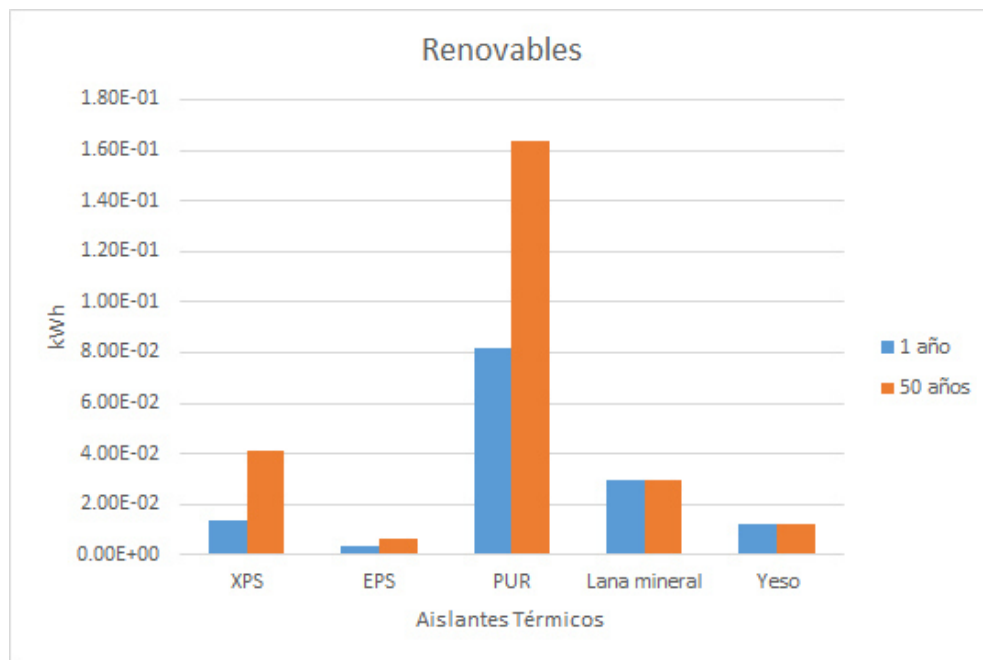


Figura 4.18: Gráfica para Uso de recursos Renovables en la vida útil de los aislantes [4].

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

Los resultados de la aplicación de la herramienta ACV indican que el aislante poliestireno expandido es la mejor alternativa desde un punto de vista ambiental debido a que tiene un menor impacto en el medio ambiente. Su producción tiene la menor contribución en cinco de las seis categorías de impacto: calentamiento global, acidificación, ozono troposférico, no renovables y renovables.

Los materiales aislantes PUR y yeso tienen, en general, las contribuciones de su producción intermedias hacia las diferentes categorías de impacto a comparación con sus competidores. No son la primera opción pero siguen siendo una opción viable para mitigar la transferencia de calor en las edificaciones.

La lana mineral presenta los peores resultados para calentamiento global. Los impactos ambientales potenciales asociados con la fabricación de lana mineral son significativamente más altos para las categorías de impacto relacionadas con la extracción / consumo de combustibles fósiles, como los no renovables y acidificación. La lana mineral es colocada en la última posición debido a su gran contribución al calentamiento global.

En general, el transporte (A2) y las fases de embalaje (A3.1) no tienen una contribución relevante para las categorías de impacto. Sin embargo, si se incrementa la distancia requerida para el transporte tanto de las materias primas como de los productos, es posible que la fase de transporte pueda resultar significativa y sea necesario estudiar su impacto ambiental (A2). Por lo tanto, la materia prima A1 y la fase de producción (A3) son las principales contribuyentes a las categorías de impacto.

En este trabajo no se consideró ninguna ponderación para las categorías de impacto, aún así el análisis de la clasificación individual es un instrumento útil para apoyar la toma de decisiones. La utilización de factores de ponderación definidos por expertos o por los tomadores de decisiones pudieran complementar significativamente este estudio, haciéndolo más sensible a los aspectos que representan más valor para la compañía. La herramienta presentada en esta tesis permite incorporar de manera sencilla dichos factores de ponderación en futuros trabajos.

5.2 TRABAJO FUTURO

Este trabajo tiene un enfoque analítico, por lo que el estudio de casos reales o implementación de lo aislantes en una edificación real se pudiera realizar mas adelante.

Los resultados del ACV reportados en este trabajo estan basados en la información de inventarios disponibles en la plataforma GEMIS. En una etapa futura, esta información de inventario podría tomarse directamente de datos reales de producción provenientes del fabricante mexicano de XPS, para reflejar de manera más precisa la realidad en nuestro país. Esta información del fabricante mexicano permitiría comprender el perfil medio ambiental del proceso productivo local y compararlo contra el resto de las alternativas.

Con el fin de minimizar el impacto ambiental de los materiales de aislamiento,

se puede realizar un estudio de las medidas de mitigación complementadas con un estudio de ACV. Por ejemplo, la fabricación de lana mineral requiere el consumo de coque como energía, que es un combustible fósil responsable de una gran contribución a los diferentes impactos ambientales. Podría ser factible el hecho que el consumo de coque se cambiara a otro combustible que pueda minimizar los impactos ambientales.

El estudio de ACV realizado en la tesis se basa en un enfoque de la cuna a la puerta, centrándose en la producción de materiales de aislamiento. Para futuras investigaciones, se puede seleccionar una obra de construcción específica y, a continuación, evaluar los potenciales impactos ambientales relacionados con otras fases, tales como el transporte de materiales de aislamiento a la obra de construcción y la eliminación de productos de embalaje y materiales de aislamiento.

A pesar de los materiales tradicionales de aislamiento térmico abordados en la tesis, hay una gama de soluciones menos convencionales que no han sido investigadas desde una perspectiva medio ambiental. Tales soluciones presentes y futuras, incluyendo paneles de aislamiento al vacío, aerogel, materiales de aislamiento al vacío, nano materiales de aislamiento y materiales de aislamiento dinámicos, tienen una baja conductividad térmica, pero su costo de producción sigue siendo muy elevado. Un ACV y el estudio económico se pueden realizar en este tipo de soluciones, comparándolos con las soluciones tradicionales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. ISO, “14040: Gestión ambiental- análisis del ciclo de vida- principios y marco de referencia,” *International Organization for Standarization*, 2006.
- [2] M. A. Curran, *Lyfe cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products*. John Wiley & Sons, 2012.
- [3] N. G. S. D. Pargana and J. de Brito, “Environmental impacts of the life cycle of thermal insulation materials of buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 466–481, 2014.
- [4] IINAS, “Gemis- global emissions model for integrated systems.” <http://www.iinas.org/gemis.html>, 2013.
- [5] INECC, “Estimación de emisiones mediante factores de emisión.” <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/457/estimacion3.pdf>, 2005.
- [6] ACCEFYN, “Factores de emisión de los combustibles colombianos,” tech. rep., Unidad de Planeación Minero Energética, 2003.
- [7] M. I. G. Suarez, “Hidrodesulfurizacion de gasoleos del crudo maya ii,” 2003.
- [8] J. G. A. Angeles, “Determinación de propiedades fisicoquímicas: Viscosidad y densidad de soluciones acuosas de alcanolaminas como función de la temperatura,” 2006.
- [9] M. I. G. Suárez, “Hidrodesulfurización de gasoleos del crudo maya ii,” 2003.

-
- [10] G. Sosa, M. Magadelano, E. Palmerin, L. Melgarejo, J. Gasca, E. Vega, G. Sánchez, and R. Rivero, “Impactos ambientales de petrolíferos con enfoque en el análisis de ciclo de vida.” http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/taller_implicaciones2008_pon_11_sosa.pdf, 2008.
- [11] M. Zimmermann, H.-J. Althaus, and A. Haas, “Benchmarks for sustainable construction: A contribution to develop a standard,” *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 11, pp. 1147–1157, 2005.
- [12] D. Gálvez, “Edificación sustentable en México: Retos y oportunidades,” 2011.
- [13] M. H. Mazon, J. D. Mutton, D. A. Russell, and G. A. Keoleian, “Life cycle greenhouse gas emissions reduction from rigid thermal insulation use in buildings,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 15, no. 2, pp. 284–299, 2011.
- [14] A. Villegas, “La nmx-c-460-onncce-2009: un camino corto hacia la sustentabilidad,” 2010.
- [15] A. M. Papadopoulos, “State of art in thermal insulation materials and aims for future developments,” *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 1, pp. 77–86, 2005.
- [16] SENER, “Ventas internas de energía eléctrica.” egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html, 2014.
- [17] M. S. Al-Homoud, “Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials,” *Building and environment*, vol. 40, no. 3, pp. 353–366, 2005.
- [18] J. Silvestre, J. de Bitro, and M. Pinheiro, “Life-cycle assessment of thermal insulation materials for external walls of buildings,” in *Proceedings of Cost C25–International Conference Sustainability of Constructions–Towards a Better Built Environment, Innsbruck, Austria*, pp. 303–310, 2011.
- [19] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. Mc Graw Hill, 2007.

-
- [20] IVE, “Productos y materiales, propiedades de aislantes térmicos para rehabilitación energética,” 2011.
- [21] G. P. Procurement, “Thermal insulation technical background report,” *European Commission, DG Environment*, 2010.
- [22] CER, “Reporte mensual de estadísticas del sector eléctrico..” <http://www.cre.gob.mx/documento/4178.pdf>, 2014.
- [23] CONUEE. www.conuee.gob.mx, 2014.
- [24] N. Pargana, M. D. Pinheiro, J. D. Silvestre, and J. de Brito, “Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 466–481, 2014.
- [25] F. Ardente, M. Becalli, M. Cellulora, and M. Mistretta, “Building energy performance: a lca case study of kenaf-fibres insulation board,” *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 1, pp. 1–10, 2008.
- [26] A. M. Papadopoulos and E. Giama, “Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building,” *Building and environment*, vol. 42, no. 5, pp. 2178–2187, 2007.
- [27] I. ISO, “14044: Environmental management-life cycle assessment- requirements and guidelines,” *International Organization for Standardization*, 2006.
- [28] J. B. Guinée, *Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards*. Luwer academy publishers, 2004.
- [29] G. Rebitzer, T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W.-P. Schmidt, S. Suh, B. P. Weidema, and D. W. Pennington, “Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications,” *Environmental international*, no. 5, pp. 701–720, 2004.
- [30] Thermocal, “Información medioambiental.” www.thermocal.es/es/normativa/informacion-medioambiental.

-
- [31] “Madera estructural.” maderaestructural.wordpress.com/tag/poliestireno-estruido/.
- [32] DOF, “Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero.” dof.gob.mx/nota_to_doc.php?codnota=5406149, 2015.
- [33] E. Santoyo-Castelazo, H. Gujba, and A. Azapagic, “Life cycle assessment of electricity generation in mexico,” *Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1488–1499, 2011.
- [34] INEGI. www.inegi.org.mx, 2015.
- [35] V. Salinas, A. Diego, and J. Porcado, “Uso de crudo maya despuntado como combustible alternativo al combustóleo,” *Boletín IIE*, vol. 25, p. 25, 2001.
- [36] N. 012, “Product-category rules (pcr) for preparing an environmental declaration (epd) for product group - insulation material,” 2007.
- [37] E. 15804, “Sustainability of construction works - environmental product declaration- core rules for the product category of construction products,” 2011.
- [38] A. Acero, C. Rodríguez, and A. Ciroth, “Lcia methods—impact assessment methods in life cycle assessment and their impact categories,” *GreenDelta GmbH, Berlin, Germany*, p. 23, 2014.
- [39] IPCC, “Directrices del ipcc de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.” <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>, 2006.
- [40] Empolime, “Fabricación del eps.” <http://www.empolime.com/fabricacion-poliestireno-expandido.htm>, 2009.
- [41] Secretaría Economía, “Estudio de la cadena productiva del yeso.” http://economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacion-Sectorial/minero/cadena_productiva_yeso_0913.pdf, 2013.

- [42] YesosEspecializados, “Fabricación del yeso.” <http://yesosespecializados.com/yeso-fabricacion.html>, 2009.
- [43]
- [44] SecretaríaEconomía, “Flujo de proceso activo y escalas de producción.” <http://www.contactopyme.gob.mx/guiasempresariales/guias.asp?s=1>, 2009.
- [45] “Elaboración del poliuretano.” <http://www.calzawebperu.com/PDF/poliuretanos.pdf>, 2014.
- [46] OwensCorning, “Foamular, aislamiento térmico de poliuretano extruido.” <http://www.owenscorning.com/mexico/fichas/foamular.pdf>, 2013.
- [47] BASF, “Styropor, informaciones técnicas.” <https://epsfoamprod.com.sharepoint.com>, 1998.
- [48] L. Álvarez, “Poliuretano proyectado en aislamiento termico.” <http://www.polypur.cl/poliuretano-proyectado-aislante.html>.
- [49] Óptimo Aislamiento, “La durabilidad del poliuretano y la durabilidad del edificio.” <http://optimoaislamiento.com/poliuretano/durabilidad-del-poliuretano/>, 2015.
- [50] P. Europe, “Aplicaciones del aislamiento con poliuretano. la solución de hoy para las necesidades del mañana.” http://www.excellence-in-insulation.eu/site/fileadmin/user_upload/PDF/library/facts/Applications_for_polyurethane_insulation_-_Today_s_solution_for_tomorrow_s_needs_-_ES_version_2011_.pdf, 2011.
- [51] GypsumAssociation, “Life cycle assessment tools.” <https://www.gypsum.org/stewardship/life-cycle-assessment-tools/>.
- [52] OwensCorning, “Epd thermafiber insulation.” <http://www.owenscorning.com>, 2013.